¿EXISTEN LAS RAZAS? • ILUSIONES GEOMETRICAS

INVESTIGACION y CIENCIA

FEBRERO 2004
5,50 EURO

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



EL EPISODIO DE IMPACTO DE CHICXULUB

AGUJEROS NEGROS EN CONDENSADOS DE BOSE-EINSTEIN

LA NUEVA LUNA

BORRADO CUANTICO

ULUGH BEG

00329
9 770210 136004



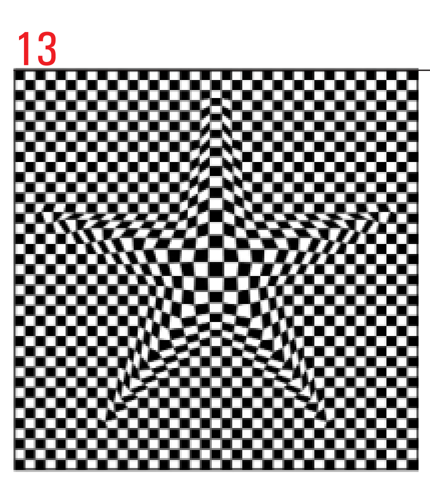
Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

Febrero de 2004

Número 329













DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR EDITOR Michelle Press
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Carol Ezzell, Steve Mirsky y George Musser
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Dean Sanderson
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN Rolf Grisebach

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18
(Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 914 843 900

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Teléfono 934 143 344

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Edificio Eurobuilding
Juan Ramón Jiménez, 8, 1.ª planta
28036 Madrid
Tel. 912 776 400
Fax 914 097 046

Cataluña:
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Antonio Arnáiz: *¿Existen las razas?*; Luis Bou: *Ilusiones geométricas* y *Aventuras problemáticas*; Joandomènec Ros: *El episodio de impacto de Chicxulub*; M.ª Rosa Zapatero: *La nueva Luna*; Adán Cabello: *Borrado cuántico*; Francesc Castelló: *Ulugh Beg* y *Las tablas de Ulugh Beg*; J. Vilardell: *Hace...*, *Apuntes* e *Ideas aplicadas*; Jürgen Goicoechea: *Curiosidades de la física*



Portada: Alfred T. Kamajian

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	60,00 euro	110,00 euro
Extranjero	85,00 euro	160,00 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 5,50 euro
Extraordinario: 6,00 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

...cincuenta años

MIEDO ROJO. «El mes pasado, la historia de los espías de Fort Monmouth se desinfló. El senador Joseph McCarthy finalizó una serie de audiencias públicas, de las que había afirmado que ‘demostrarían la existencia de espionaje’ en el laboratorio de radar de Fort Monmouth. Su desfile de testigos no ha conseguido revelar testimonio alguno sobre espionaje. De los aproximadamente 30 científicos del Cuerpo de Transmisiones suspendidos por el Ejército a resultas de las investigaciones de McCarthy, ninguno fue acusado de espionaje. Walter Millis, redactor del *New York Herald Tribune*, comentaba en su columna: ‘Se ha arruinado un establecimiento militar verdaderamente vital y sensible, con mayor saña de lo que habría soñado un saboteador soviético... [mediante] la caza de brujas, el más puro fanatismo, la cobardía, los prejuicios raciales y una absoluta incompetencia’.»

PLAGA DE CONEJOS. «Con sentimientos diametralmente opuestos se asiste en diferentes partes del mundo a las dos caras del fenómeno objeto de este artículo: la mixomatosis, enfermedad infecciosa mortal de los conejos. Deliberadamente introducida en Australia hace tres años, se ha extendido por áreas inmensas, produciendo una gran epizootia en los conejos. En Australia, se saluda la enfermedad como una salvación que libra al continente de su peor plaga; en Europa, donde brotó en 1952, se la ve como un asesino malévolo que amenaza con aniquilar a un animal muy preciado para la mesa, la caza, la compañía y el laboratorio. Con la intención de controlar la enfermedad en Europa, se persigue una vacuna contra el virus mixoma.»

...cien años

RAYOS QUÍMICOS. «El señor Aug. Charpentier plantea un interesante problema: la diferencia entre los rayos desprendidos por los seres vivos y los rayos N descubiertos por el señor René Prosper Blondlot. En su opinión, esa radiación de los organismos se compone de rayos N y alguna forma nueva de radiación. Esto vale en especial para los rayos procedentes de los centros nerviosos, o nervios; presentan la sorprendente característica de que los interrumpa parcialmente una pantalla de aluminio. Una lámina de 0,5 mm basta para rebajar considerablemente los rayos emitidos por un punto del cerebro. Por el contrario, la pantalla de aluminio apenas modifica los rayos procedentes del corazón, el diafragma y los músculos. Esto constituye una diferencia característica entre las radiaciones musculares y las nerviosas. El efecto generado por los nervios aumenta fuertemente con la compresión; el de los músculos, mucho menos.» [*Nota de la redacción: Acabaría comprobándose que ninguna de estas formas de radiación existía.*]

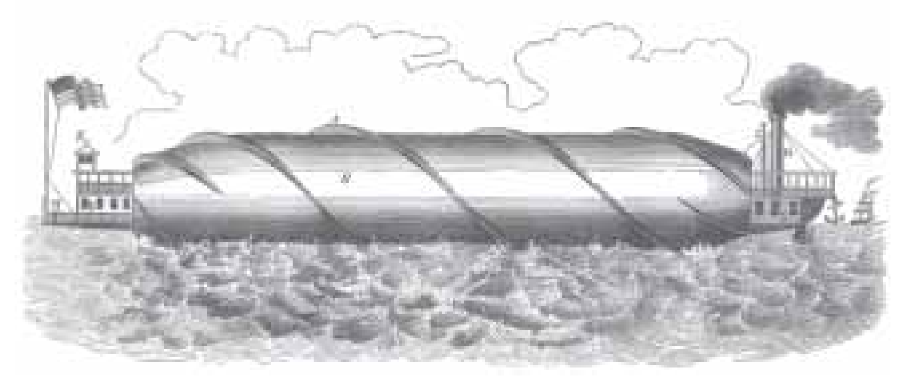
LA TORRE EIFFEL. «En *Scientific American* del 26 de diciembre se anunciaba que la famosa Torre Eiffel estaba a punto de venirse abajo, dada la acusada tendencia al vuelco que mostraba. El señor Eiffel niega tal cosa y se refiere al informe del señor Mascart, presidente de la Academia de Ciencias, en el que se dice que ‘la torre se halla en un perfecto estado de conservación, sin que se hayan notado cambios de posición ni en los cimientos ni en la estructura’. Toda comisión competente que hasta ahora haya estudiado la torre ha defendido el buen estado de la estructura y avalado su utilidad científica.»

Y AHORA LOS MALVADOS ÑUES. «No parece haber dudas de que el aspecto tan grotesco del ñu es una previsión de la naturaleza para proteger al animal. Cuando se les asusta o molesta, esos notables antílopes realizan una serie de extrañas evoluciones y extraordinarios gestos, al objeto de acentuar la rareza y fealdad de su apariencia y ahuyentar a los intrusos.»

...ciento cincuenta años

PELIGRO OCEÁNICO. «El grabado adjunto corresponde a una locomotora marina, invento de Henry A. Frost, de Worcester (Massachusetts). Las aletas helicoidales son solidarias de la cara exterior del casco. El cilindro interior, montado en el fondo, mantiene siempre la misma posición. Dispone de un salón que ocupa toda la longitud del buque. El inventor confía plenamente en haber puesto en marcha una revolución total en los viajes oceánicos.»

ERROR ESTADÍSTICO. “«En la Tierra hay 1.000.000.000 de habitantes, de los que cada año mueren 33.333.333, o sea, uno cada segundo. Esas pérdidas son compensadas por un número casi igual de nacimientos.»



Locomoción marina antes de la dinámica de fluidos, 1854

APUNTES

ETOLOGIA

Perplejidad

Cuando se nos muestra una serie de imágenes, solemos recordar mejor las primeras y las últimas; si se nos pregunta por las intermedias, no sabremos qué contestar. Se ha sometido a la misma prueba a unos monos rhesus. Rehusaban dar una respuesta, por lo general, ante las imágenes intermedias. Aunque no manifestaban las sensaciones de duda propias de humanos, sí parece que sopesan opciones alternativas en situaciones inéditas. Podría investigarse qué otras especies cuentan con esa capacidad. Al parecer, las ratas y las palomas no; los delfines, sí.

—*J. R. Minkel*



Los animales también dudan

GEORGE D. LEEP *Corbis*

ELECTRONICA

El transistor emisor de luz

El creador del diodo emisor de luz, Nick Ulanyak, el diseñador del transistor bipolar más rápido, Milton Feng, y Walid Hafez, estudiante de doctorado —tres generaciones de ingenieros—, han anunciado la consecución del primer transistor emisor de luz. Se trata de un transistor bipolar de heterounión de fosfuro de indio y galio y arseniuro de galio. En la base del transistor se recombinan electrones y huecos —cargas positivas ligadas a la falta de electrones—. Por lo general, el diseño persigue que se minimice este efecto, porque genera un calor inútil. En cambio, Holonyak, Feng y Hafez lo han maximizado para que la base emita fotones infrarrojos. Es parecido a lo que ocurre en los diodos emisores de luz, pero permite modular la luz de salida a velocidades mucho mayores. De momento, han logrado hacerlo a 1 MHz. Si se consiguiesen velocidades mayores, y parece muy posible, el dispositivo —que ofrece además de la nueva salida óptica una electrónica— sería apto para su inclusión en chips, donde las conexiones conductoras entre los componentes podrían sustituirse, o combinarse, con conexiones ópticas.

VIDA EN EL ESPACIO

Agua potable

Este mismo mes publicamos un artículo donde se habla de que una estación lunar podría obtener el agua que necesitase en la propia Luna. George Bush, por otra parte, anuncia el propósito de enviar de nuevo seres humanos al satélite; la intención es que "vivan y trabajen allí durante períodos cada vez más largos". Pero, aunque se cumpliesen las palabras presidenciales, no parece que los futuros astronautas pudieran conseguir su agua lunar arrancando pedazos de hielo de una masa compacta. Los sondeos por radar de hace unos años dejaban abierta la posibilidad de que hubiese depósitos semejantes a glaciares en las zonas sombreadas de los cráteres cercanos a los polos. Los datos, sin embargo, se han interpretado de forma muy dispar. La detección de hidrógeno por el Lunar Prospector despierta menos dudas. En todo caso, estas investigaciones no ahondaron más de un metro o dos en el suelo de la Luna. El radar de Arecibo lo ha escrutado ahora, con ondas de 70 centímetros de longitud, hasta una hondura de más de cinco metros, en pequeños cráteres del Polo Norte y en los cráteres Shoemaker y Faustini del Polo Sur. Al recibirse en el observatorio ecos débiles, se concluyó que no se había dado más que con roca lunar y polvo, que absorben la mayor parte del haz. La decepción de no haber encontrado depósitos potentes no quiere decir que no haya agua. El suelo podría contener cristales del tamaño de pelotas de golf. Pero si fuesen sólo como copos de nieve, recolectarlos sería difícil. Además, si hubiera habido agua por debajo de los dos metros de profundidad, la cantidad total habría sido mucho mayor que los diez mil millones de toneladas que, según se calcula en estos momentos, posee la Luna, poco más que una laguna. Con sólo esa cantidad, se trataría de un recurso muy escaso. Pese a todo, no es imposible que haya agua en sitios aún no explorados. Ben Bussey, de la Universidad Johns Hopkins, cree que la extensión de las "trampas gélidas" que encierran el hielo lunar duplica la supuesta hasta ahora. Podría haber depósitos en suelos de cráteres invisibles desde la Tierra.

—*Sarah Simpson*

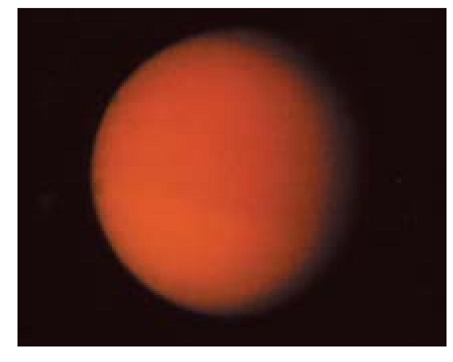
Los cráteres Shoemaker y Faustini devolvieron ecos débiles de la señal de radar.

BRUCE A. CAMPBELL *Institución Smithsoniana*

ASTRONOMIA

Mares de metano

Titán, la mayor de las lunas de Saturno y único cuerpo del sistema solar, aparte de la Tierra, con una atmósfera rica en nitrógeno, esconde su superficie bajo una espesa neblina anaranjada. Las observaciones de radar efectuadas con radiotelescopios instalados en tierra han atravesado esa cortina nubosa. Al parecer, hay allá lagos de hidrocarburos líquidos. En los ecos de radar se descubrieron unos picos agudos, que señalan la existencia en Titán de zonas reflectoras lisas y oscuras; lo más probable es que sean líquidas. ¿Y qué líquidos puede haber en Titán, con temperaturas de –180 grados? Análisis anteriores de la atmósfera del satélite hallaron metano y otros hidrocarburos, que podrían caer como lluvia sobre la superficie (se cree que formada por agua congelada) y crear lagos de metano y etano líquidos. *—J. R. Minkel*



NASA/*Laboratorio de Propulsión a Chorro*

Titán, la mayor de las lunas de Saturno, podría albergar, bajo su velo anaranjado, lagos de hidrocarburos

ASTROFISICA

Experimento mental

Si cayéramos de pie en un agujero negro, experimentaríamos una atracción más fuerte en el calcañar que en la coronilla. Nos estiraría y estrujaría. En cualquier agujero esférico y sin rotación, sólo pasarían 0,0904 segundos desde que la diferencia de aceleración entre la cabeza y los pies empezara a desmembrarnos —cuando decuplicase g, celeridad que imparte la gravedad en la superficie de la Tierra— hasta que se alcanzara el centro del agujero. Según J. Richard Gott y Deborah L. Freedman, rodeándonos de un aro más pesado que un asteroide podríamos demorar el momento de la muerte. Esta fantasía tiene el interés de mostrar cómo se entrelazan diversos fenómenos físicos, en apariencia desligados, en un problema concreto. Para que el aro no se derrumbase sobre sí mismo por su propio peso, debería estar dotado de carga, de suerte que la repulsión electrostática compensase la atracción gravitatoria entre sus partículas; éstas se moverían, pues, en mera caída libre. El radio del salvavidas sería en todo momento proporcional a la distancia al centro del agujero. Así, al tirar el aro hacia arriba desde nuestros pies y hacia abajo desde nuestra cabeza con su propia atracción gravitatoria, lo haría en cada momento (si su masa y radio fuesen adecuados) con una intensidad que contrarrestaría las cada vez mayores fuerzas de marea del agujero. El intenso campo eléctrico del salvavidas cargado no nos afectaría si nos rodease una esfera conductora, una "jaula de Faraday". Ahora bien, ese campo estimularía la producción de pares de electrones y positrones en el vacío alrededor del aro; éste atraería a los electrones y repelería a los positrones, hasta que se descargase. Con una masa del anillo del orden de una millonésima de la masa de la Tierra y un radio —en el momento en que empezáramos a desmembrarnos— de 28,47 metros, el tiempo de descarga sería de 1,3 segundos y el que pasaría entre ese comienzo de la tortura y el final en el centro del agujero, de sólo $3{,}46 \times 10^{-3}$ segundos. Gracias al anillo, se habrían contrarrestado fuerzas de marea de 6760 g. La muerte vendría tan deprisa, que no se percibiría su llegada.

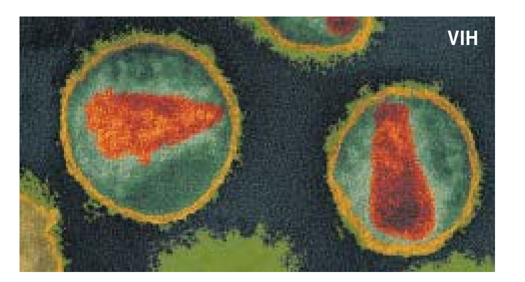
MEHAU KULYK *Photo Researchers, Inc.*

INMUNOLOGIA

La resistencia al sida y la viruela

Una mutación impide la producción de una proteína celular a la que se liga el VIH; así, protege del sida. Como mucho, alrededor de un diez por ciento de los europeos cuenta con esa mutación. Debe de ser reciente; quizá se originó hace sólo 700 años. Se ha supuesto que ofrecía resistencia a la peste bubónica que asoló Europa en otros tiempos. Unos genetistas de la Universidad de California en Berkeley sostienen, en cambio, que protegía de la viruela. La distribución geográfica de ésta concuerda bien con las frecuencias de la mutación en Europa. La viruela, además, encaja mejor con la idea de que una mutación permanecerá en el acervo génico si proporciona alguna ventaja: la peste bubónica desapareció del mundo hace 250 años; la viruela, sólo hace 26. Además, el agente de la peste es una bacteria, mientras que el VIH es un virus de ARN.

—Charles Choi





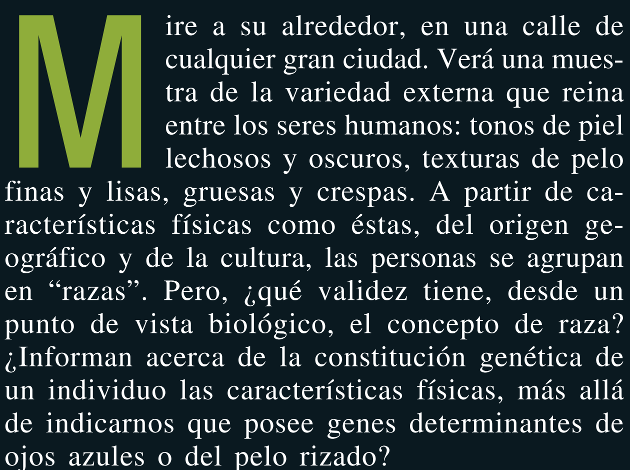
EYE OF SCIENCE *Photo Researchers, Inc.*

La resistencia al VIH podría deberse a una mutación que se originó hace 700 años y protegía de la viruela

¿Existen las razas?

Si las razas se definen como grupos genéticamente separados, no. Pero se pueden utilizar marcadores genéticos para agrupar individuos con fines médicos y terapéuticos

Michael J. Bamshad y Steve E. Olson

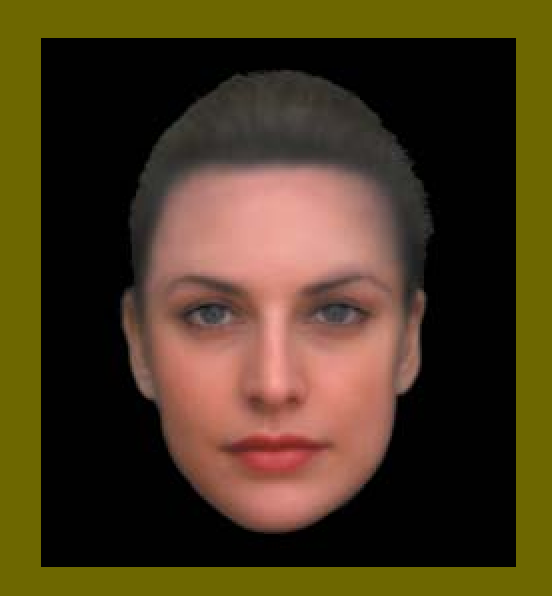


Mire a su alrededor, en una calle de cualquier gran ciudad. Verá una muestra de la variedad externa que reina entre los seres humanos: tonos de piel lechosos y oscuros, texturas de pelo finas y lisas, gruesas y crespas. A partir de características físicas como éstas, del origen geográfico y de la cultura, las personas se agrupan en "razas". Pero, ¿qué validez tiene, desde un punto de vista biológico, el concepto de raza? ¿Informan acerca de la constitución genética de un individuo las características físicas, más allá de indicarnos que posee genes determinantes de ojos azules o del pelo rizado?

Entre otras razones, el problema resulta complicado porque los criterios de pertenencia a una raza varían de una región a otra. Alguien denominado "negro" en EE.UU., por ejemplo, podría ser considerado "blanco" en Brasil y "coloreado" (una categoría distinta de "negro" y "blanco") en Sudáfrica.

Sin embargo, las definiciones ordinarias de las razas generan en ocasiones grupos que se corresponden bastante bien con propensiones genéticas a sufrir ciertas enfermedades. La anemia falciforme, por ejemplo, se da sobre todo en personas de ascendencia mediterránea o africana, mientras que la fibrosis quística abunda bastante más entre las de ascendencia europea. Según varios estudios —cuyos resultados no están exentos, en absoluto, de controversia—, los negros norteamericanos responden peor que otros grupos a determinados fármacos indicados en cardiopatías.





ILUSTRACIONES FOTOGRAFICAS DE NANCY BURSON

En los últimos años se han acumulado datos sobre la constitución genética de poblaciones de todo el mundo, con la mira puesta en la posible relación entre la herencia y las pautas de alguna enfermedad. Estos datos aportan respuestas a diversas cuestiones, muy sensibles y delicadas. Así ¿podemos apelar a la información genética para separar grupos humanos que comparten una herencia común y asignar individuos concretos a uno u otro grupo? ¿Se corresponden tales grupos con las descripciones habituales de las razas? Desde un punto de vista práctico, las divisiones, se basen en las definiciones raciales ordinarias o en el parecido genético, ¿nos enseñan algo útil acerca de cómo afectan las enfermedades o los fármacos a los miembros de cada grupo?

En general, cabría contestar de manera afirmativa a la primera cuestión, negativa a la pregunta segunda y con un sí matizado a la tercera. Para ello nos basamos en algunas generalizaciones sobre raza y genética. Hay grupos que difieren de otros en su contenido génico, pero la división en grupos depende de los genes que se examinen. Dicho de manera simplista: uno puede quedar incluido en un grupo conforme a los genes responsables del color de la piel y en otro si atendemos a una característica distinta. Muchos estudios han demostrado que alrededor del 90 % de la variabilidad genética humana ocurre en el seno de una población que vive en un determinado continente; sólo en torno al 10 % de la variabilidad distingue a las poblaciones de continentes diferentes. En otras palabras, los individuos de poblaciones diversas son, en promedio, sólo un poco más diferentes que los individuos de una misma población. Las poblaciones humanas guardan una estrecha semejanza, si bien pueden distinguirse.

Clasificación de los seres humanos

Como primer paso para unir las definiciones sociales de raza y de herencia genética, se necesita una forma fiable de dividir grupos de acuerdo con su linaje. Durante los últimos 100.000 años, los hombres anatómicamente modernos emigraron desde Africa hacia todas las partes del mundo e incrementaron muchísimo su número. Esta expansión ha dejado una clara huella en nuestro ADN.

Para determinar el grado de parentesco entre grupos, los genéticos se basan en polimorfismos del ADN; en particular, los relativos a las secuencias de pares de bases que componen los bloques de ADN. La mayoría de estos polimorfismos no aparecen en los genes, segmentos de ADN que codifican la información para la síntesis de proteínas (las moléculas que constituyen gran parte de nuestro organismo y mantienen las reacciones químicas de la vida). Se trata, pues, de variaciones neutras, en el sentido de que no afectan directamente a ningún rasgo particular. No obstante, sí hay algunos polimorfismos en los genes; pueden contribuir a la variabilidad de rasgos y de enfermedades genéticas de un individuo a otro.

Resumen/*Genética de la "raza"*

- Los signos externos en que se basan la mayoría de las definiciones de raza (el color de la piel, la textura del pelo) están determinados por unos pocos genes. Pero el resto del genoma de dos personas de la misma "raza" varía en sumo grado. A la inversa, la semejanza genética puede ser mayor entre dos personas de diferentes "razas" que entre un par de individuos de la misma "raza".
- Pese a ello, cabe recurrir a la genética para clasificar la mayoría de las poblaciones según su origen geográfico ancestral. Este enfoque no ofrece tan buenos resultados cuando las poblaciones actuales proceden de la mezcla reciente de diferentes grupos.
- Las implicaciones médicas de las diferencias genéticas raciales siguen siendo objeto de controversia.

Los autores

MICHAEL J. BAMSHAD Y STEVE E. OLSON han llegado a la variabilidad genética humana desde lados distintos. Bamshad es genético de la facultad de medicina de la Universidad de Utah; Olson, escritor científico.

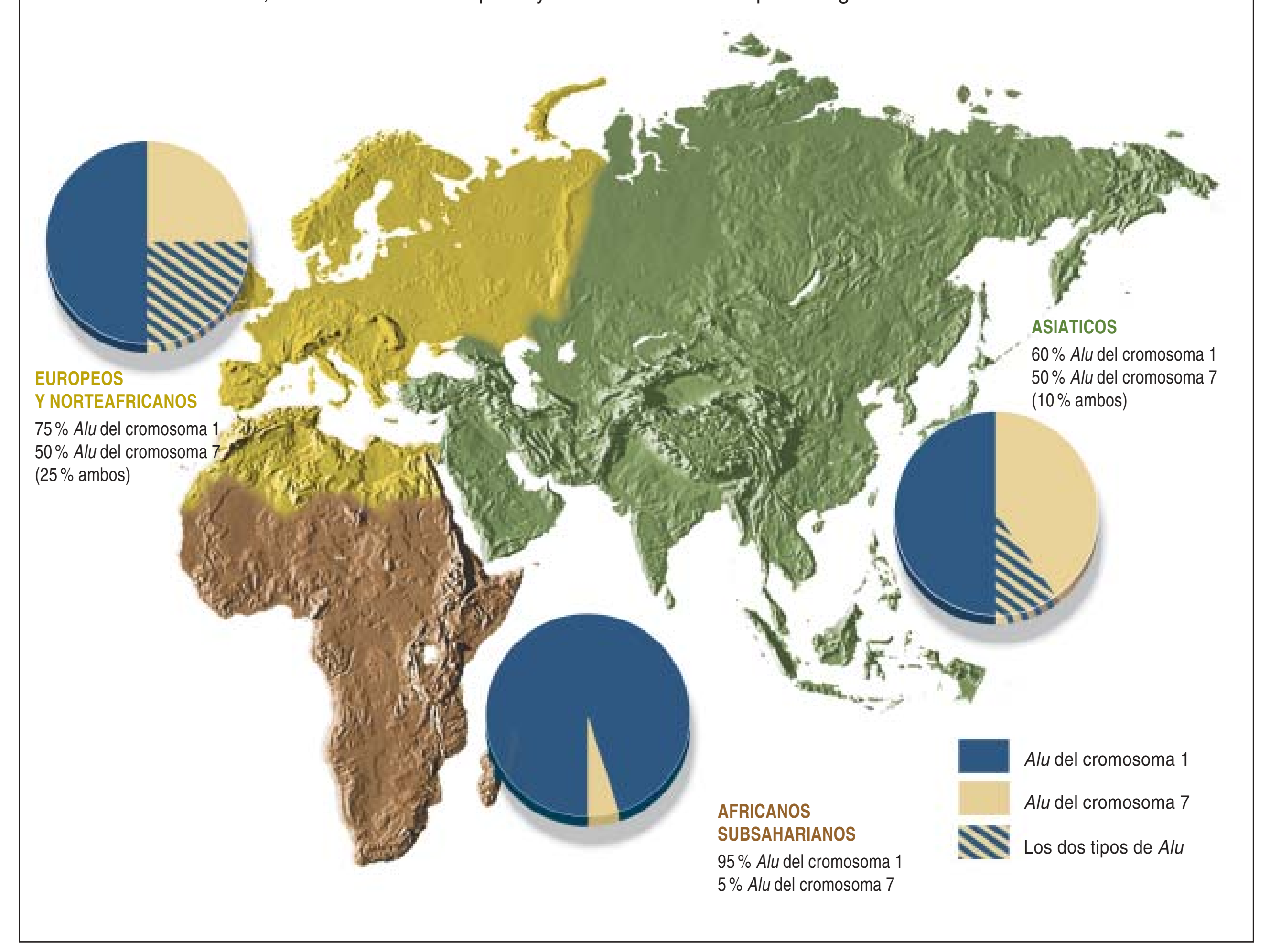
Al secuenciarse el genoma humano (todo el ADN nuclear), se han identificado millones de polimorfismos, cuya distribución en las poblaciones refleja la historia de éstas y los efectos de la selección natural. Para distinguir entre grupos, el polimorfismo genético ideal sería uno que estuviera presente en todos los miembros de un grupo y ausente en los miembros de los grupos restantes. Pero los principales grupos humanos se han separado entre sí muy recientemente, para mezclarse luego en alto grado. No existen, pues, grandes diferencias entre ellos.

Con todo, las diferentes frecuencias con que aparecen los polimorfismos por el mundo sirven para clasificar a las personas, de manera aproximada, en grupos. Un polimorfismo útil lo constituye el *Alu*, cortos segmentos de ADN de secuencia afín. De cuando en cuando los *Alu* se replican; las copias resultantes se reparten al azar en una nueva posición, dentro del cromosoma original o en otro cromosoma; por lo normal, en una parte donde no afecten al funcionamiento de los genes. Cada inserción constituye un episodio único. En cuanto la secuencia *Alu* se ha insertado en un lugar, puede permanecer ahí durante miríadas de años; se hereda en ese sitio de padres a hijos. Por tanto, si dos personas presentan la misma secuencia *Alu* en un mismo punto del genoma, se deduce que tienen un antepasado común, que les donó ese segmento específico de ADN.

Uno de los autores (Bamshad), con Lynn B. Jorde, Stephen Wooding y W. Scott Watkins, de la Universidad de Utah, y con Mark A. Batzer, de la Universidad de Louisiana, estudió 100 polimorfismos *Alu* diferentes en 565 personas nacidas en el Africa subsahariana, Asia y Europa. Empezamos por determinar la presencia o ausencia de los 100 *Alu*

DIVERSIDAD GENETICA HUMANA

SUELEN UTILIZARSE UNOS SEGMENTOS CORTOS de ADN, los polimorfismos *Alu,* para determinar si varias poblaciones están emparentadas entre sí. Aunque carecen de función conocida, los *Alu* se copian e insertan de manera aleatoria por el genoma. Como los *Alu* que se insertan se mantienen invariables, sus patrones sirven de marcadores para estimar el grado de parentesco genético entre dos personas (y como promedio, dos poblaciones). En el cromosoma 1 se ha observado cierto polimorfismo *Alu* en el 95 % de los africanos subsaharianos, el 75 % de los europeos y norteafricanos y el 60 % de los asiáticos; mientras que alrededor del 5 % de los subsaharianos, el 50 % de los europeos y norteafricanos y el 50 % de los asiáticos portan otro polimorfismo *Alu* diferente en el cromosoma 7. Algunos individuos tienen ambos. Por sí solo, ningún polimorfismo permite distinguir a todos los miembros de un grupo importante humano de todos los miembros de otro grupo; ahora bien, si se analizan cientos de polimorfismos, resulta posible agrupar individuos procedentes de distintas áreas geográficas a partir de sus perfiles genéticos.



NADIA STRASSER

en cada individuo. De los datos obtenidos, eliminamos luego las señales identificadoras (lugar de origen y grupo étnico), para clasificar a las personas en grupos de acuerdo con un solo criterio: la información genética.

Se crearon así cuatro grupos distintos. Cuando restituíamos las etiquetas de identificación para ver si la asignación de cada individuo a un grupo guardaba correlación con las designaciones habituales de raza o etnia, observamos que dos de los grupos contaban sólo con individuos del Africa subsahariana; uno de ellos estaba constituido nada más que por pigmeos mbuti. El tercer grupo lo conformaban individuos procedentes de Europa; de Asia oriental, el cuarto. Resultó que necesitábamos 60 polimorfismos *Alu* para asignar, con un 90 % de seguridad, a los individuos a su continente de origen; para alcanzar casi el 100 % de seguridad, se requerían unos 100 *Alu*.

Se han obtenido resultados similares en otras investigaciones. Noah A. Rosenberg y Jonathan K. Pritchard, por entonces en el laboratorio de Marcus W. Feldman, de la Universidad de Stanford, se valieron de unos 375 polimorfismos STR ("short tandem repeats", "repeticiones seriadas cortas") para abordar un millar largo de personas de 52 grupos étnicos de Africa, Asia, Europa y América. De acuerdo con la variación de sus frecuencias, distinguieron cinco grupos diferentes, cuyos antepasados quedaron separados por océanos, desiertos o mon-

tañas: subsaharianos, europeos y asiáticos del oeste de los Himalayas, asiáticos del este, habitantes de Nueva Guinea y Melanesia y, por fin, amerindios. Identificaron también subgrupos dentro de cada región; solían concordar con la etnia que se había asignado a sí misma cada individuo.

Estos estudios demuestran que los análisis genéticos pueden distinguir grupos de personas según su origen geográfico. Sin embargo, han de interpretarse con mucho cuidado. Los grupos que menos costaba singularizar eran los más separados geográficamente; presentaban la mayor variabilidad genética intergrupal. Cuando Bamshad y sus colaboradores utilizaron 100 polimorfismos *Alu* para encuadrar en un grupo propio a los individuos del sur de la India, vieron que mostraban mayor afinidad con los europeos o con los asiáticos. En otras palabras, los habitantes del subcontinente indio conformaban un grupo genuino, sino que se repartían por otros grupos. Se debe a que la India ha conocido un flujo genético europeo y asiático. Por consiguiente, tenemos que barajar cientos (o quizá miles) de polimorfismos para distinguir entre grupos cuyos antepasados hayan procedido de muchas poblaciones.

La raza humana

Cabe, pues, agrupar, en términos muy generales, a las personas gracias a los datos genéticos. Pero, ¿concuerdan las razas, conforme a su definición ordinaria, con agrupaciones genéticas? En algunos casos sí, pero frecuentemente no. Por ejemplo, el color de la piel o los rasgos faciales —caracteres influidos por la selección natural— se emplean de forma rutinaria para dividir a la humanidad en razas. Sin embargo, grupos a los que la selección natural ha dotado de características físicas similares pueden exhibir bastantes diferencias genéticas. Los individuos del Africa subsahariana y los aborígenes australianos tendrán una pigmentación de piel similar (por su adaptación a la fuerte insolación), pero divergen en su constitución genética.

En cambio, dos grupos genéticamente similares pueden hallarse expuestos a una presión de selección distinta. En este caso, la selección natural exagerará algunas diferencias entre los grupos, de manera que a simple vista parezcan más desemejantes de lo que en realidad son. Puesto que el color de piel y otros rasgos vienen condicionados por la selección natural, no reflejan necesariamente los procesos poblacionales que han ido conformando la distribución de polimorfismos neutros (*Alu* o STR). Más aún, los rasgos o polimorfismos afectados por la selección natural tal vez sean malos indicadores de la pertenencia de un individuo a un grupo genético; quizá den a entender una relación de parentesco genético donde apenas existe.

Otro ejemplo de la dificultad que entraña cualquier clasificación de las personas nos lo ofrecen los estadounidenses. Allí, la mayoría de las personas que se consideran afroamericanas tienen unos antepasados bastante recientes en Africa occidental; los naturales de esa región exhiben en general unas frecuencias polimórficas que difieren de las de europeos, asiáticos y aborígenes norteamericanos. Sin embargo, la proporción de variación genética que comparten afroamericanos y africanos occidentales dista de ser uniforme, ya que durante siglos los afroamericanos se han mezclado con grupos originarios de otras partes de Africa y de fuera de Africa.

En los últimos años, Mark D. Shriver, de la Universidad estatal de Pennsylvania, y Rick A. Kittles, de la Universidad Howard, han definido un conjunto de polimorfismos para evaluar, con él, la fracción de los genes de un individuo originada en cada región del continente. Han encontrado que la contribución de los africanos occidentales al patrimonio génico de los afroamericanos es, en promedio, de un 80 %, aunque oscila entre el 20 % y el 100 %. La mezcla de grupos queda clara también en muchos individuos cuyo linaje suponen ex-

LAS ILUSTRACIONES

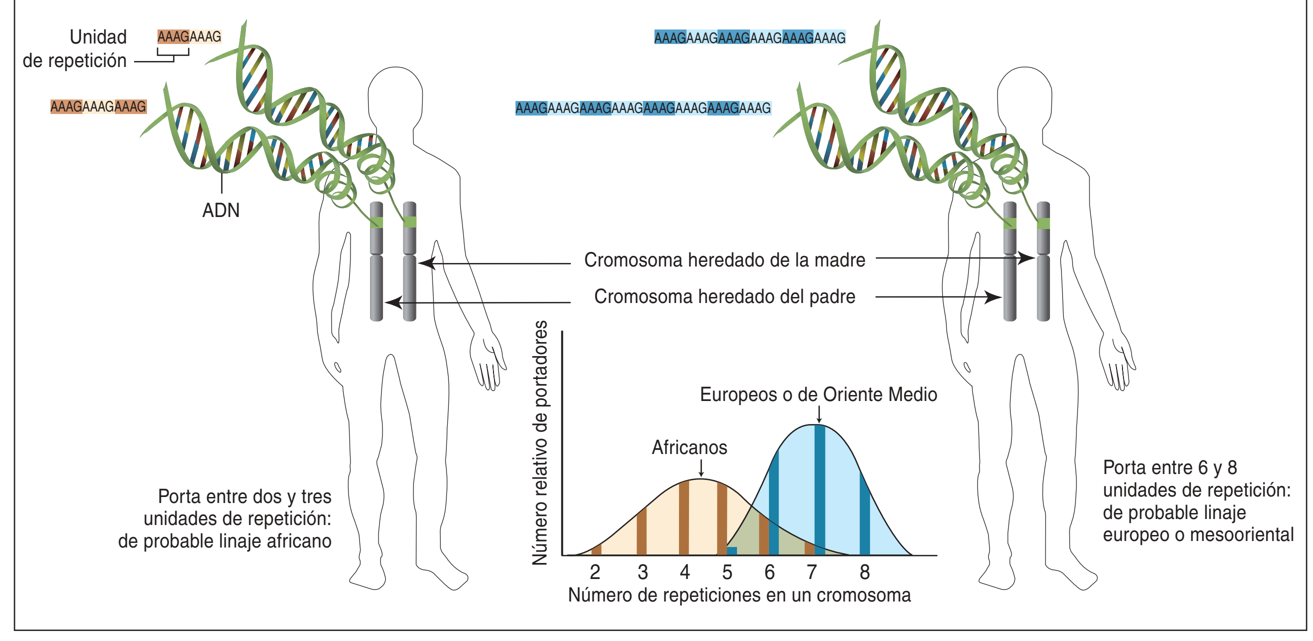
DEBEMOS A NANCY BURSON, artista neoyorquina, las fotografías alteradas que ilustran este artículo. Para su creación se ha servido de un dispositivo de su invención, al que llama "máquina de las razas humanas". La máquina toma una fotografía de un individuo (en este caso una mujer blanca) y añade o quita diversos rasgos externos de la identidad racial; se muestra así qué aspecto tendría si perteneciese a otra raza. Se propone así subrayar lo que de común tiene la humanidad. El aspecto externo dice poco de la constitución genética global de una persona. La máquina de las razas humanas fue una de las atracciones más populares del Domo del Milenio, en Londres.



CORTESIA DE NANCY BURSON

LOS ORIGENES HUMANOS

CONTAR EL NUMERO DE CIERTAS UNIDADES de ADN, las repeticiones seriadas cortas, permite agrupar a los individuos según sus probables ancestros. Una de esas repeticiones, AAAG, se encuentra seriada entre dos y siete veces en quienes cuentan con herencia africana, y entre cinco y ocho en los individuos cuyo linaje procede de Europa o de Oriente Medio. (Cada persona hereda un conjunto de repeticiones de su madre y otra de su padre.) Por ello, es probable que quien porte dos o tres repeticiones pertenezca a un linaje africano, mientras que alguien que presente de seis a ocho repeticiones probablemente tendrá ancestros de Europa o de Oriente Medio. Individuos con cinco, seis o siete repeticiones existen en ambas poblaciones; con sólo AAAG, no resultaría fácil clasificarlos.



NADIA STRASSER

clusivamente europeo. Según los cálculos de Shriver, un 30 % de los estadounidenses que se consideran a sí mismos “blancos” tiene menos del 90 % de ascendencia europea. Por tanto, la autoasignación de antepasados no predice con fiabilidad la composición genética de un gran número de estadounidenses. En resumen, el concepto habitual de raza no siempre refleja la composición genética de los individuos.

Efectos de la pertenencia a un grupo

La relación entre raza y variabilidad genética tiene importantes aplicaciones de orden aplicado. Hay polimorfismos cuyas frecuencias difieren de un grupo a otro que operan efectos específicos en la salud. Las mutaciones responsables de la anemia falciforme y ciertos casos de fibrosis quística son el resultado de cambios genéticos cuya frecuencia parece haber aumentado gracias a que protegían de enfermedades arraigadas en Africa y Europa. Los individuos que heredan una sola copia del gen de la anemia falciforme presentan resistencia a la malaria; los que heredan una sola copia del gen de la fibrosis quística están menos expuestos a la deshidratación producida por el cólera. Los síntomas de esas dos enfermedades genéticas sólo se manifiestan en los individuos que han heredado dos copias de la mutación (una del padre y otra de la madre).

La variabilidad genética interviene también en la susceptibilidad individual a uno de los flagelos de nuestra época: el sida. Hay quienes tienen una pequeña deleción en sus dos genes homólogos —las dos copias del gen— que codifican el receptor de quimiocina 5 (CCR5). Esos individuos no producen receptores CCR5 en la superficie de sus células. La mayoría de las cepas del virus del sida (VIH-1) se unen a los receptores CCR5 para entrar en las células; por eso, quienes carecen de tales receptores resisten la infección del virus del sida. Este polimorfismo del gen del receptor CCR5 se encuentra, casi exclusivamente, en grupos procedentes del nordeste de Europa.

Diversos polimorfismos de CCR5 no evitan la infección, pero modifican la frecuencia con que su curso deriva hacia el sida y la muerte. De éstos, algunos ejercen efectos similares en poblaciones diferentes; otros sólo alteran la velocidad de la progresión de la enfermedad en grupos determinados. Por ejemplo, uno de los polimorfismos se asocia a la propensión a ralentizar la enfermedad en los europeo-americanos, pero la acelera en los afroamericanos. Sólo resultará posible estudiar tales efectos, específicos de poblaciones, y aprovecharlos con fines terapéuticos, si nos permiten distribuir a la gente en grupos.

En estos y otros ejemplos un polimorfismo repercute, de manera apreciable en el curso de una pa-

tología dada. Si los rastreos genéticos fuesen baratos y eficaces, se podría analizar a todos los individuos en busca de todas las variantes génicas asociadas a enfermedades. Pero las pruebas genéticas son caras. Además, preocupa lo que supondrían para el libre consentimiento y la privacidad los análisis genéticos generalizados; algunas personas quizá no deseen saber si tienen factores genéticos que incrementan el riesgo de desarrollar una cierta enfermedad. Hasta que estas cuestiones no encuentren soluciones satisfactorias, la pertenencia a un linaje, manifestada por el propio paciente, seguirá siendo un método de diagnóstico potencialmente útil.

La información acerca del linaje podría también ser pertinente para ciertas patologías extendidas en determinadas poblaciones. Las más comunes, como la hipertensión y la diabetes, se deben a polimorfismos de genes diversos, cada uno con su pequeña influencia. Parece, se sabe desde hace poco, que hay polimorfismos que causan un determinado efecto en un grupo y no en otro. Semejante complejidad impediría que se les tomara como guía terapéutica. Hasta que no se conozcan con exactitud las contribuciones genéticas y ambientales a las enfermedades complejas (poligénicas), los médicos tendrán que fiarse de la autoinclusión de los pacientes en un grupo u otro a la hora de escoger el mejor tratamiento para las mismas.

Raza y medicina

En estos años se ha debatido con especial intensidad qué importancia pueda tener, en el marco de la administración sanitaria, la pertenencia a un grupo concreto. En enero del año pasado la Agencia de Alimentación y Fármacos de Estados Unidos dictó unas directrices que obligaban a tomar nota de la raza y la etnia en todos los ensayos clínicos. Algunos investigadores objetaron tal medida, basándose en que las diferencias entre los grupos son tan pequeñas y los abusos históricos asociados a la clasificación de los seres humanos en razas tan grandes, que lo mejor sería que no se mezclasen las cuestiones raciales con los estudios médicos y genéticos. La Agencia, pues, debería retirar su recomendación e impulsar, en cambio, la toma de datos genómicos de los individuos que participen en ensayos clínicos. Otros sostienen, por el contrario, que sólo gracias al grupo étnico, aunque se defina de la manera más simple, por el color de la piel, cabe comprender cómo contribuyen a la patología las diferencias genéticas y ambientales entre grupos. Este debate sólo se resolverá con investigaciones más exhaustivas sobre la validez de la “raza” como variable científica.

En el número del 20 de marzo de 2003, la revista *New England Journal of Medicine* publicó varios artículos, desde ópticas contrapuestas, sobre las implicaciones médicas de la noción de raza. En el artículo firmado por Richard S. Cooper, de la facultad Stritch de medicina de la Universidad Loyola, Jay S. Kaufman, de la Universidad de Carolina en Chapel Hill, y Ryk Ward, de la Universidad de Oxford, se razonaba que la raza no ofrecía a los médicos un criterio adecuado cuando se trata de elegir un medicamento para un paciente dado. Señalaban dos hallazgos relativos a las diferencias raciales que ahora parecen dudosos: 1) que una combinación de ciertos medicamentos vasodilatadores era más efectiva en el tratamiento de los fallos cardíacos de pacientes con antepasados africanos, y 2) que los inhibidores de la enzima conversora de angiotensina (ACE) resultaban poco eficaces en ese mismo tipo de pacientes. En otro artículo, el equipo dirigido por Neil Risch, de la Universidad de Stanford, contraargüía que las diferencias genéticas entre grupos étnicos o raciales tienen importancia clínica; estos autores citaban un estudio que demostraba que la tasa de complicaciones de la diabetes tipo II varía según la raza, incluso una vez se han tenido en cuenta los factores sociales (las diferencias de educación o de ingresos, por ejemplo).

La viveza de esta discusión refleja factores científicos y sociales por igual. Muchos estudios biomédicos no han definido rigurosamente el criterio de pertenencia a un grupo; se limitan a inferir relaciones a partir de las categorías raciales. La disputa sobre la importancia que tiene la pertenencia a un grupo étnico ilustra, además, hasta qué punto las perspectivas sociales y políticas moldean la percepción de la “raza”.

En los casos donde la pertenencia a un grupo definido cultural o geográficamente se ha correlacionado con caracteres genéticos asociados a la salud, saber acerca de la pertenencia de un paciente a un determinado grupo podría servir de ayuda al médico. Y en la medida en que los grupos humanos viven en diferentes ambientes o padecen diferentes experiencias que afecten a la salud, la pertenencia a un grupo reflejará también factores que, aunque no sean genéticos, cuentan desde un punto de vista clínico.

Aparte de las implicaciones médicas de la genética de la raza, los hallazgos científicos que hemos comentado aquí revisten interés por sí mismos. Desde hace siglos nos hemos preguntado de dónde proceden los diferentes grupos humanos y qué parentescos hay entre ellos, por qué varía la apariencia física de unas poblaciones humanas a otras y si las diferencias biológicas son más profundas que la piel. Los nuevos datos genéticos y los nuevos métodos de análisis nos permiten ahora abordar estas cuestiones. El resultado será un conocimiento mucho mayor tanto de nuestra naturaleza biológica como de la interconexión humana.

Bibliografía complementaria

MAPPING HUMAN HISTORY: GENES, RACE, AND OUR COMMON ORIGINS. Steve Olson. Mariner Books, 2003.

HUMAN POPULATION GENETIC STRUCTURE AND INFERENCE OF A GROUP MEMBERSHIP. Michael J. Bamshad et al. en *American Journal of Human Genetics*, vol. 72, n.º 3, págs. 578-589; marzo, 2003.

THE IMPORTANCE OF RACE AND ETHNIC BACKGROUND IN BIOMEDICAL RESEARCH AND CLINICAL PRACTICE. Esteban González Burchard et al. en *New England Journal of Medicine*, vol. 348, n.º 12, págs. 1170-1175; 20 de marzo, 2003.

RACE AND GENOMICS. Richard S. Cooper, Jay S. Kaufman y Ryk Ward en *New England Journal of Medicine*, vol. 348, n.º 12, págs. 1166-1170; 20 de marzo, 2003.

Ilusiones geométricas

Las distintas prioridades que el cerebro gestiona engendran una multitud de ilusiones geométricas. La observación nos las hace "ver" y la imaginación nos incita a crearlas

Jacques Ninio

El cerebro es geómetra notable. Resuelve, por métodos misteriosos todavía, los problemas de geometría que plantea la comprensión de las formas y las relaciones espaciales. Lo hace automáticamente, con la rapidez del rayo, sin que nos percatemos del trabajo llevado a cabo. Su capacidad para apreciar defectos ínfimos de alineación y de paralelismo, o diminutas variaciones de longitud y curvatura, resulta excelente. En tareas de comparación, alcanza sensibilidades del uno por ciento en la apreciación de discrepancias e incluso mejores.

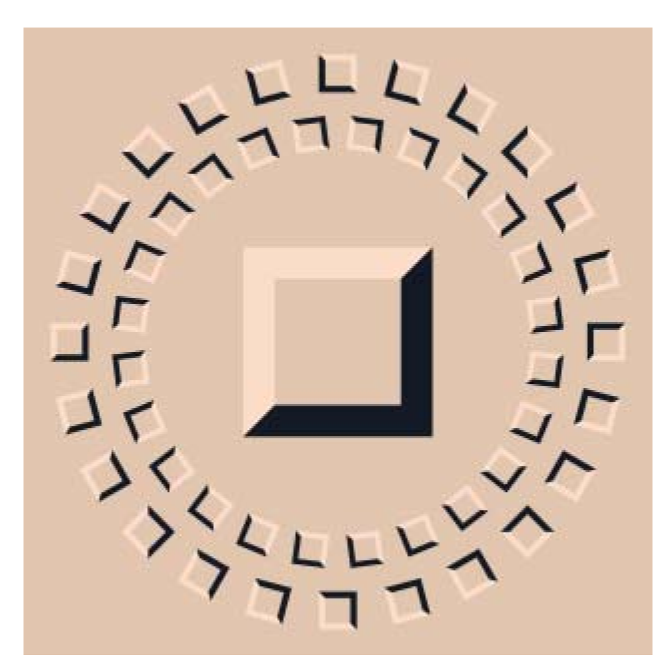
Junto a este nivel de exigencia geométrica, la percepción visual da pruebas de una flexibilidad muy notable. En la lectura, por ejemplo, el cerebro discierne los trazos de un texto manuscrito entre la multitud de sus variantes y nos permite reconocer un rostro a pesar del sinfín de sus expresiones o de sus alteraciones por la edad.

La visión adquiere las informaciones geométricas por múltiples vías. Cuando nos desplazamos, la imagen del mundo exterior que se proyecta en la retina se modifica. El cuerpo avanza, la cabeza sube y baja con respecto al cuerpo, los ojos efectúan movimientos exploratorios. Ciertos elementos de la escena se mueven también. Nos será necesario deducir, a partir de esta riada de información óptica, en qué dirección nos movemos, determinar qué elementos del ambiente se encuentran fijos y cuáles en movimiento, comprender su disposición geométrica e identificar las formas. La misma escena, fijada en un fotograma, obedecería a las leyes de la perspectiva lineal, pero nada obliga al cerebro a extraer del flujo visual representaciones que obedezcan a las leyes de la perspectiva, lo cual, por cierto, no realiza: ¡tiene otras prioridades!

Mecanismos de corrección

En primer lugar, como ocurre también en el caso del contraste, nuestra representación de lo real busca hacernos captar las propiedades permanentes de las cosas, más que su aspecto momentáneo. Aunque incline usted la página que está leyendo, aun cuando la incline mucho, los caracteres conservan su forma y su legibilidad, a pesar de que la proyección sobre la retina ha experimentado compresiones enormes. El cerebro, sin aparente esfuerzo, ha efectuado las anamorfosis inversas con el fin de restituir a las letras su forma habitual.

Las líneas paralelas (por ejemplo, las líneas de separación de los ladrillos de un muro), vistas bajo una



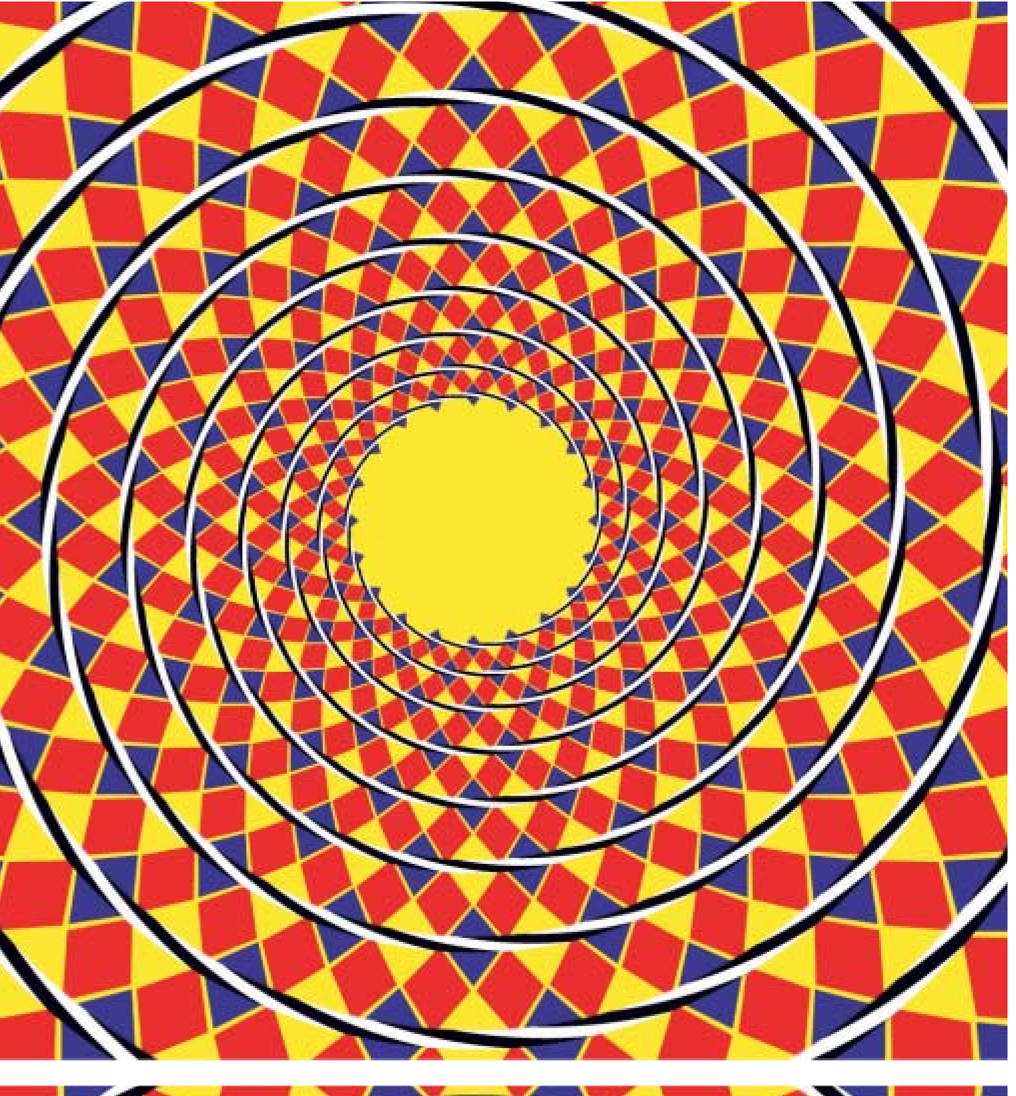
1. SOMBRAS Y RELIEVE. El motivo repetido de esta figura, ampliado en el centro, corresponde a esos botones que, en las pantallas de ordenador, remedan una superficie resaltada o hundida, en la que se inscribe una opción. El motivo se ha reproducido, muy ampliado, en el centro. El relieve se invierte al girar la página 180 grados. Si partimos de lo alto, y hacemos el recorrido de los motivos de las dos coronas, por la derecha o por la izquierda, llega un momento en que la interpretación bascula: el resalte se torna en hueco, o recíprocamente. Podemos entonces volver hacia lo alto, "pensando ver" en hueco el mayor tiempo posible. Se comprueba igualmente que un mismo botón es susceptible de ser juzgado como depresión o como resalte. El prejuicio del cerebro respecto a la posición de la fuente de luz responsable de las luces y las sombras no es, pues, demasiado estricto.

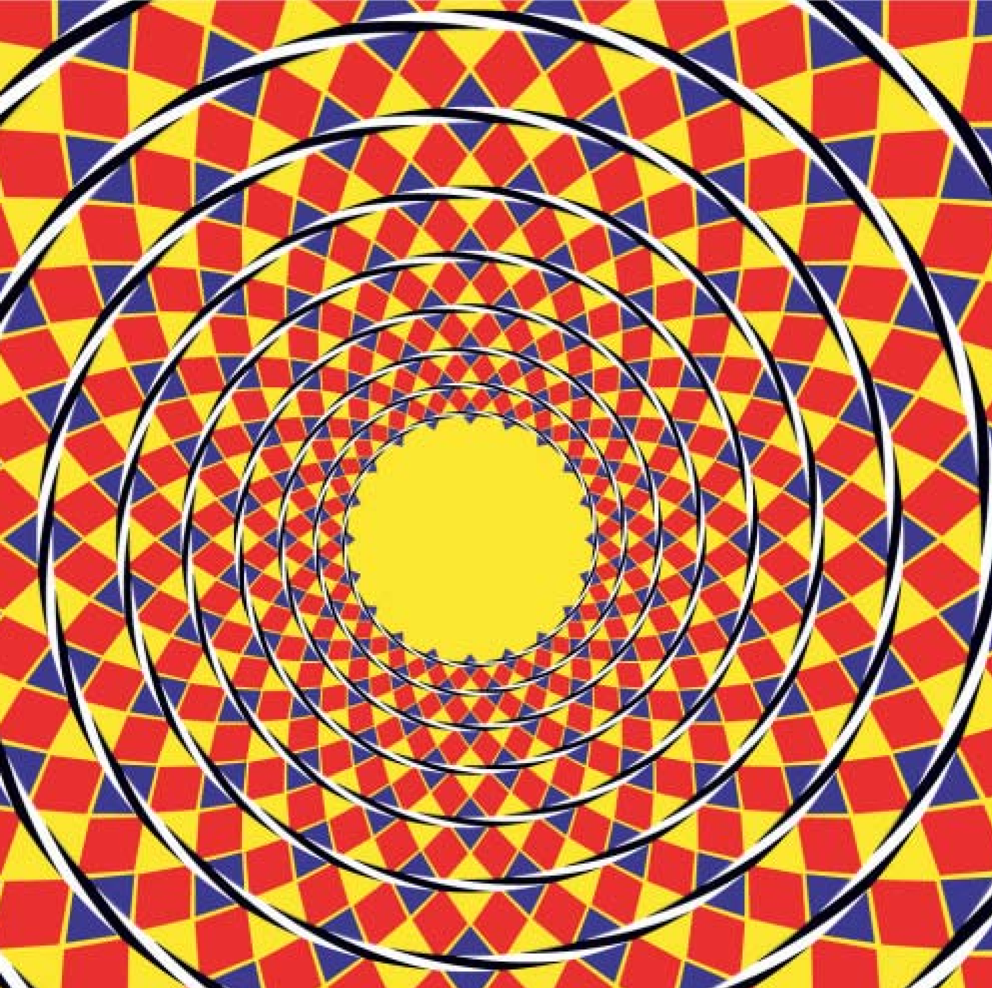
JACQUES NINIO

fuerte inclinación (y, en especial, en visión lateral), deberían, en perspectiva, converger fuertemente. Ahora bien, el hecho mismo de “ver en profundidad” equivale a descomprimir, a devolver a las cosas el espacio, a tornar un poco menos convergentes las proyecciones de las líneas paralelas.

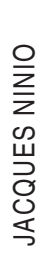
La búsqueda de propiedades permanentes se aplica igualmente al tamaño de los objetos. El rostro de la persona sentada frente a nosotros, a un metro de distancia, parece tener el mismo tamaño que el de otra a dos metros. Sin embargo, en la proyección sobre la retina, el segundo de estos rostros ocupa una superficie cuatro veces menor que el primero. La percepción nos proporciona, pues, una representación retocada, en la que el tamaño aparente de los objetos varía poco con su lejanía, al menos hasta varios metros de distancia.

Tales compensaciones se aplican sobre todo en el plano horizontal, no tanto en la dirección vertical: vistos desde un balcón, los paseantes parecen menores de lo que serían





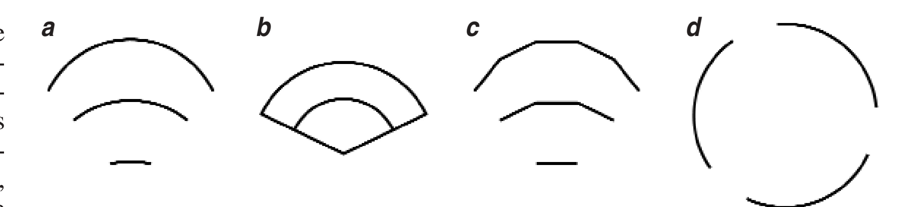
2. ESPIRAL DE FRASER. En la figura superior, los arcos blancos adyacentes a los arcos negros parecen arrollarse en espiral; sin embargo, forman parte de círculos concéntricos. El efecto ilusorio queda amortiguado, si no eliminado, en la parte de abajo. La diferencia entre ambas figuras es sutil: en la superior, los arcos blancos pasan a través de cuadrados oscuros, de color azul marino, mientras que, abajo, lo hacen a través de cuadrados más claros, de color amarillo. En la de arriba, el cerebro diferenciaría los arcos blancos de los negros; trataría estos dos conjuntos por separado. En la de abajo, los arcos blancos y los negros, que tienen menor contraste con los cuadrados que atraviesan, se tratarían conjuntamente y, en consecuencia, agrupados en coronas circulares. La problemática de la cooperación o de la separación del blanco y del negro, o de lo claro y lo oscuro, importa también en los cuadrados de fondo. Se organizan éstos en arcos, en los que, por ejemplo, los cuadrados oscuros, de color azul marino, quedan adosados por sus lados a cuadrados intermedios, rojos. La organización radial, que asociaría los cuadrados por sus vértices, no se percibe, pese a ser perfecta.



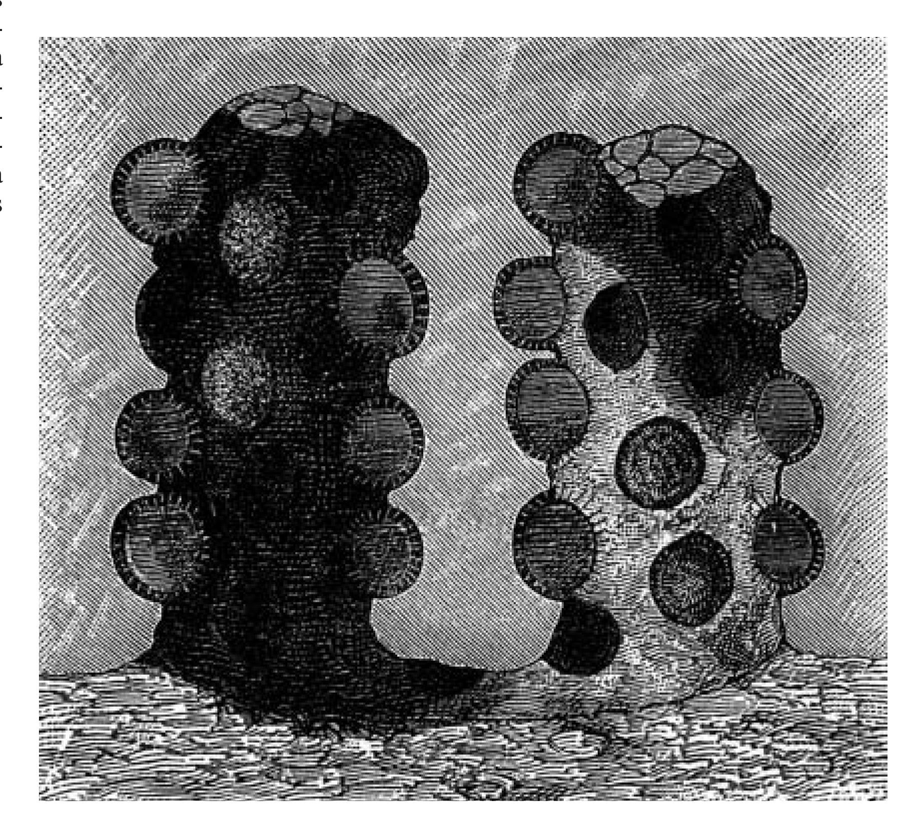
vistos a su nivel, en la calle, desde la misma distancia. De esta constatación resulta la práctica que consiste en exagerar, en las esculturas monumentales, las partes más elevadas de las estatuas; en cambio, nunca se siente la necesidad de compensar en sentido horizontal las deformaciones provocadas por la perspectiva. Al contrario que los tamaños, las orientaciones quedan bien compensadas en el sentido vertical: las aristas verticales de los inmuebles no parecen converger hacia lo alto, mostrando incluso tendencia a separarse, mientras que en las fotografías su convergencia resulta manifiesta.

La corrección de tamaños en función de la distancia comienza a plantear problemas cuando la evaluación de las distancias se torna errónea. El pajarillo que vuela en la niebla, el roedor que atraviesa de noche la carretera, observados brevemente a través del parabrisas de un automóvil, se agrandan desmesuradamente. Cuando la Luna está a poca altura sobre el horizonte suele parecer muy grande, sobre todo si hay una ligera bruma. Nada tiene en ello que ver la óptica: se trata de una ilusión visual. La Luna sería tratada como un objeto situado a distancia finita. Diversos indicios (sobre los cuales debaten los especialistas) intervendrían sobre esta distancia implícita, y por consecuencia, sobre el factor de corrección del tamaño que nosotros atribuimos. A mi entender, en esta ilusión lo esencial es que, de todos modos, las compensaciones de tamaño intervienen mucho menos en el sentido vertical que sobre el plano horizontal. La ilusión resultaría en tal caso idéntica a la que se produce cuando se ve a unas personas en un balcón, que parecen más pequeñas que vistas a la misma distancia en un plano horizontal.

También resulta corregido otro aspecto no realista de la perspectiva. Pensemos en la fachada rectangular de un inmueble, muy alargado en sentido horizontal, visto de frente. En un dibujo en perspectiva, la base y la cornisa de la fachada se representan mediante líneas horizontales; el contorno del inmueble es rectangular. Ahora bien, si el delineante evalúa las proporciones del inmueble por el método del lápiz (estirando el brazo en dirección al objeto con un lápiz en la mano y determinando qué porción del lápiz recubre la parte cuyo tamaño aparente desea conocer), constatará que la altura aparente del inmueble es mayor en el centro, donde la dis-

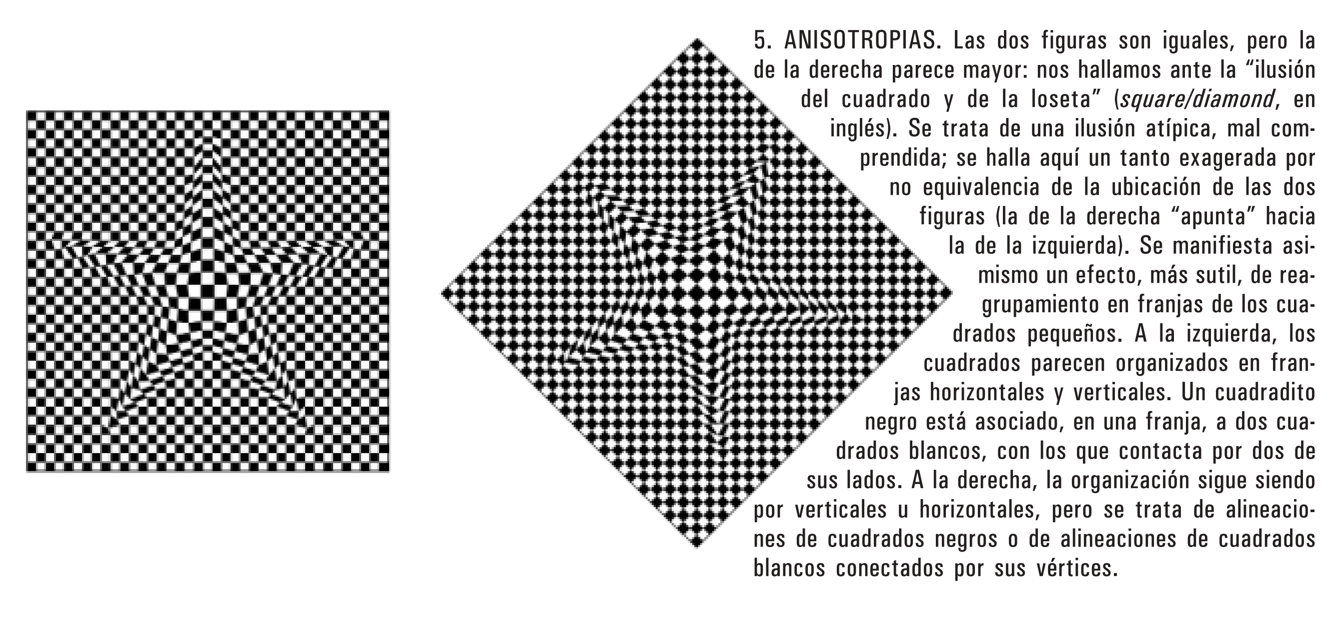


3. APLANAMIENTO DE LOS ARCOS PEQUEÑOS. Los tres arcos de la figura *a* se han extraído de un mismo círculo. Sin embargo, cuanto más corto es el arco, más plano parece, un efecto que figura en el repertorio de ilusiones geométricas. Por otra parte, lo que denominamos forma de una figura designa un carácter que no depende de la ampliación: un círculo es siempre igual de circular, tanto si su radio es grande como si es pequeño. Los dos arcos de la figura *b*, homotéticos, tienen la misma forma y radios diferentes, mientras que los de la figura *a* no son homotéticos; constituyen dos fragmentos diferentes de un mismo círculo, al igual que los fragmentos de un mismo polígono que vemos en *c*. Los arcos, con independencia de su tamaño, tienden a parecer demasiado planos, como se observa en la figura *d*, en la que tres arcos, pertenecientes al mismo círculo, parecen formar parte de un círculo mayor venido a menos.



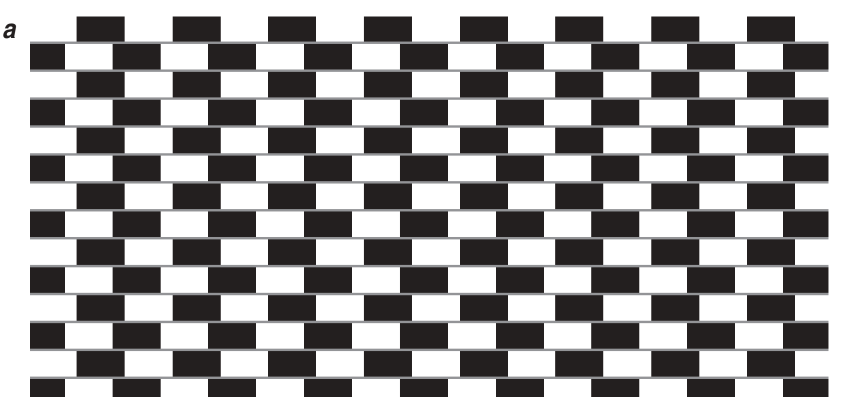
JACQUES NINIO

4. ¿QUE ES ESTO? Este dibujo, publicado en *La Nature* en 1890, muestra una “marmita de erizos” en una roca litoral. En realidad, el dibujo, que representa la roca en sección, se ha girado 180 grados. Según que examinemos la hoja al derecho o al revés, el dibujo parece en hueco o en resalte. La interpretación que debió desear el dibujante en el grabado original casa mal con la versión invertida. En el dibujo en corte, uno imagina que la parte trasera de la marmita se continúa en las partes laterales, visibles. En la imagen invertida, las partes visibles se convierten en bloques separados. Un mecanismo de completación debería inducirnos a pensar en una superficie envolvente por delante del plano de corte.

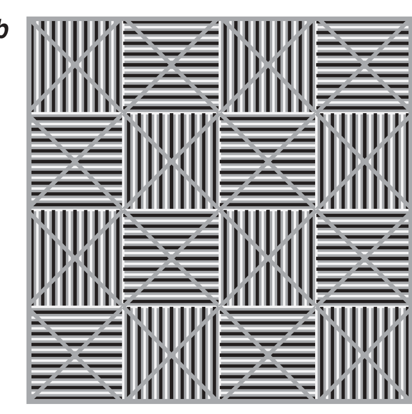


5. ANISOTROPIAS. Las dos figuras son iguales, pero la de la derecha parece mayor: nos hallamos ante la "ilusión del cuadrado y de la loseta" (*square/diamond*, en inglés). Se trata de una ilusión atípica, mal comprendida; se halla aquí un tanto exagerada por no equivalencia de la ubicación de las dos figuras (la de la derecha "apunta" hacia la de la izquierda). Se manifiesta asimismo un efecto, más sutil, de reagrupamiento en franjas de los cuadrados pequeños. A la izquierda, los cuadrados parecen organizados en franjas horizontales y verticales. Un cuadradito negro está asociado, en una franja, a dos cuadrados blancos, con los que contacta por dos de sus lados. A la derecha, la organización sigue siendo por verticales u horizontales, pero se trata de alineaciones de cuadrados negros o de alineaciones de cuadrados blancos conectados por sus vértices.

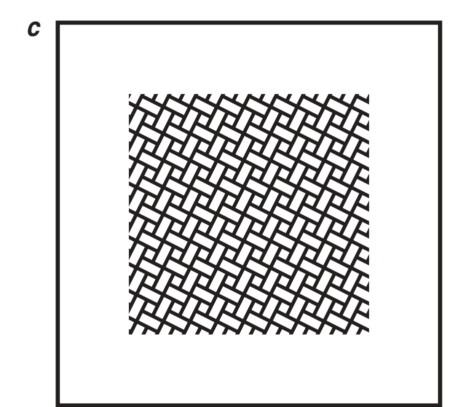
a



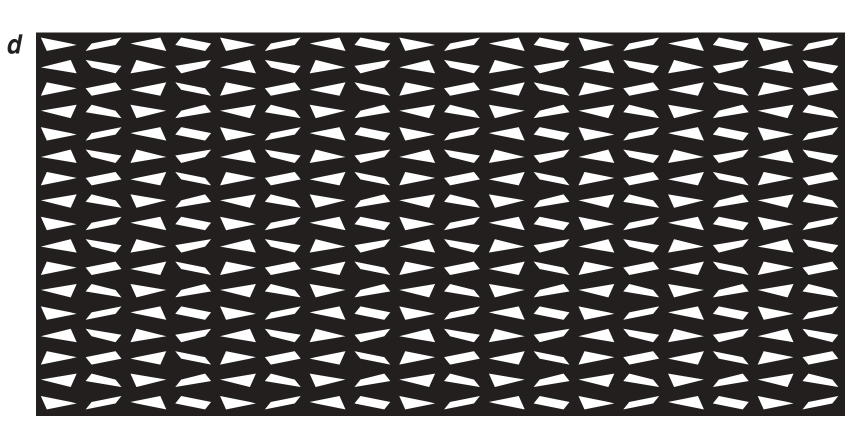
b



c



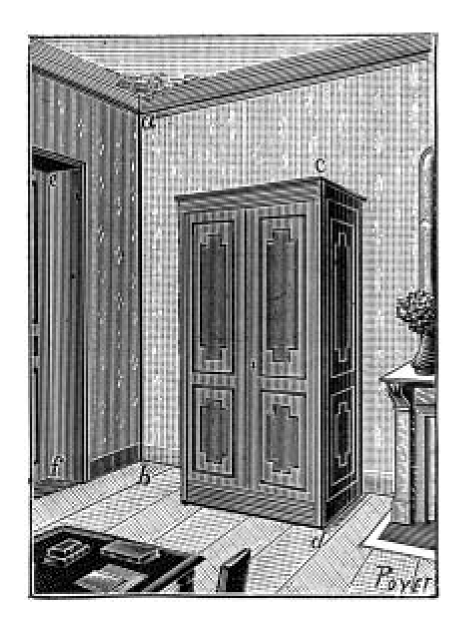
d



6. INCERTIDUMBRE DE ORIENTACION. La ilusión de Münsterberg, *a*, data de 1897; anterior, pues, a la espiral de Fraser descubierta en 1908. Las líneas grises, de mortero, que separan los ladrillos, son todas ellas paralelas, pero no lo parecen. Al igual que en la espiral de Fraser, la percepción de la orientación parece depender del contraste con el ambiente local. Arriba y a la derecha, *b*, las diagonales grises parecen doblarse en sentidos opuestos, según que atraviesen a los cuadrados de bandas verticales o a los de bandas horizontales (conviene examinar la figura de arriba abajo para apreciar mejor la diferencia). Muchos lectores serán igualmente sensibles a un segundo efecto, independiente del primero: uno de los sistemas de bandas parece tener fuerte contraste, mientras que los cuadrados del otro sistema presentan un aspecto desvaído. El carácter ilusorio de estas diferencias de contraste se comprueba girando la página 90 grados. Abajo a la izquierda, *c*, el cuadrado texturado parece hallarse inclinado. De forma general, las rectas paralelas que inciden en otra formando un ángulo pequeño (alrededor de 22 grados) hacen que esta última pivote en el sentido de aumentar el ángulo de incidencia. Abajo a la derecha, *d*, vemos organizarse alineaciones que forman un ángulo pequeño con la horizontal, asociando elementos alargados, alternativamente blancos y negros. Estas bandas parecen ondulantes, pese a ser completamente rectas.

JACQUES NINIO

7. INTERPRETACION PERSPECTIVISTA de las ilusiones geométricas. Este grabado, publicado en *La Nature* del 18 de enero de 1896, iba acompañado del siguiente comentario de Emile Javal: "Nos resultaría difícil creer que las líneas *ab* y *cd* son perfectamente iguales, porque sabemos perfectamente que el armario tiene menor altura que la habitación." Las líneas *ab* y *cd*, completadas por los rincones y esquinas en las que concluyen, forman configuraciones del tipo Müller-Lyer. La disposición en cola de flecha salientes en los extremos de *ab* tropieza con líneas verticales lejanas, mientras que la disposición que rodea a *cd* se observa, sobre todo, en objetos cercanos. De aquí la explicación perspectivista: tenemos la costumbre de estimar más largas las líneas semejantes a *ab* y, menos largas las líneas como la *cd* "y seguimos conservando este hábito cuando ya no existe su razón de ser".



tancia es mínima, que en las extremidades, más lejanas.

De atender a esta lógica, que es la de la perspectiva curvilínea, un dibujo realista daría al inmueble un aspecto ovalado, no rectangular. La perspectiva rectilínea corresponde a una visión "fotográfica", en la que el ojo permanece fijo e inmóvil. La perspectiva curvilínea corresponde a una toma móvil, en la que el ojo se vuelve sucesivamente hacia cada porción que ha de ser evaluada.

La obtención de una adecuada representación perceptiva del espacio y de las formas es, así pues, mucho más delicada de lo que comúnmente se cree. En ocasiones vemos una ilusión donde sólo hay una deficiente destreza en el análisis de formas (*véase la figura 3a*). Las ilusiones geométricas no son aberraciones de la visión, sino, más bien indicios de una geometría perceptiva efectuada a instancia nuestra por conjuntos de neuronas cerebrales.

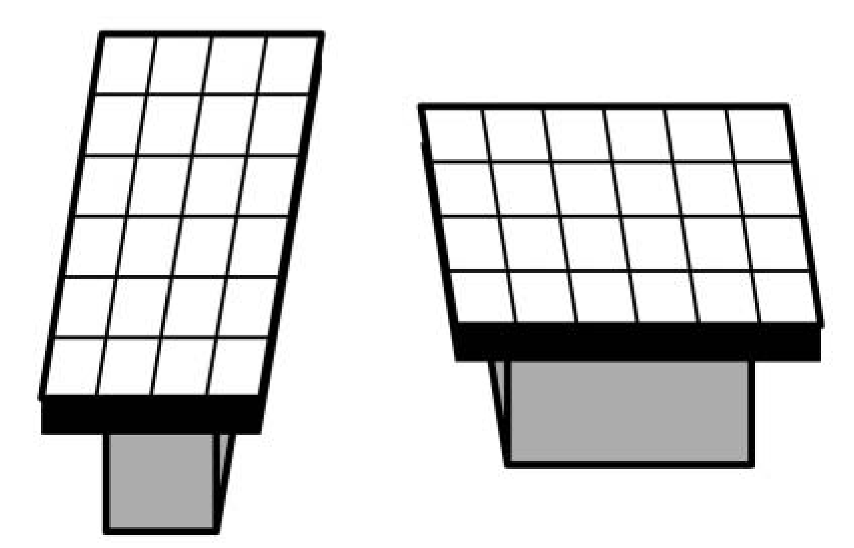
Además de las ilusiones asociadas a la percepción del tamaño, examinaremos las ilusiones de orientación y las nacidas de la proyección de una figura del espacio sobre un dibujo. Trataremos, por último, de explicar algunos de los principios que sustentan estas ilusiones, cuyo estudio revela algunos procesos neuronales que participan en nuestra percepción.

Inversiones

Desde el siglo XV los pintores han logrado crear excelentes efectos de volumen plasmando reflejos sobre metal, vidrio o madera barnizada, mediante la delicada gradación de sombras y luces sobre la piel de sus personajes. En nuestros días, los infografistas disponen de útiles que calculan los reflejos y las sombras en función de las fuentes de luz primarias y secundarias. Tanto el éxito de los procedimientos antiguos como el de los más recientes implican que el cerebro "sabe" suficiente geometría para resolver el problema inverso: la extracción de la forma de los objetos a partir de los indicios que proporcionan las luces y las sombras. Una de las dificultades que esta tarea entraña es que, a menudo, las imágenes no hacen figurar las fuentes luminosas, cuya posición no se conoce bien.

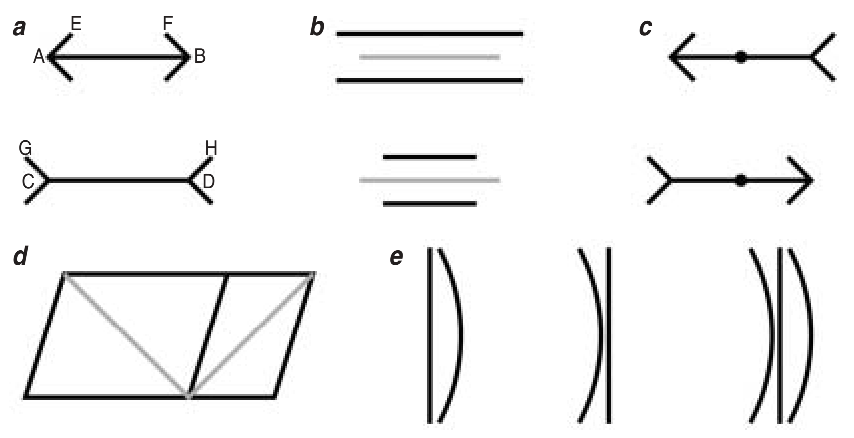
La relativa claridad de una porción de superficie indica que se encuentra próxima de la fuente de luz o que se halla orientada de tal modo que encamina la luz hacia el ojo del observador, salvo que se trate de una variación local del color o de la reflectancia de la propia superficie.

Una sombra yacente sobre una superficie denota, por ejemplo, la presencia de otra superficie que se interpone entre la primera y la fuente de luz. Las sombras sirven, así, para dotar de profundidad a las superficies. En esta operación, el cerebro conjetura la dirección de la fuente de luz: la sitúa hacia lo alto de la



8. LAS MESAS DE SHEPARD. Los tableros de ambas mesas, y sus enlosados, admiten una superposición exacta. En una interpretación perspectivista, la mesa de la derecha es más ancha y la de la izquierda, más larga, porque nosotros imaginamos que están representadas en profundidad. La impresión de divergencia hacia el fondo de la imagen se justifica por el deseo de agrandar lo lejano. Al dar la vuelta a la página, las mesas se tornan divergentes hacia abajo, como si, estando suspendidas del techo, fueran sus partes bajas en el dibujo las más alejadas. La diferencia de forma (tablero ancho/tablero alargado) se mantiene en todas las orientaciones. Esta ilusión se observa asimismo —aunque de forma atenuada— con dos simples paralelogramos sin florituras, dispuestos según la configuración de los dos tableros representados.

JACQUES NINIO



9. ILUSION DE MÜLLER-LYER es la ilusión geométrica más conocida (*a*). Los dos segmentos AB y CD tienen igual longitud; sin embargo, AB parece más pequeño que CD. Esta ilusión, y sus numerosas variantes, puede describirse por un principio de asimilación, según el cual la apreciación de la longitud de un segmento resulta modificada por la longitud de los segmentos vecinos: AB sería "atraído" hacia EF; CD lo sería hacia GH. El efecto Müller-Lyer se detecta incluso en la variante minimalista del centro (*b*), que carece de flechas. En la variante de Judd (*c*), los puntos señalados, que ocupan el punto medio de su segmento, parecen dividirlos de forma desigual y parecen ser atraídos hacia las puntas de las flechas. En el paralelogramo de Sander (*d*), las dos diagonales en gris son iguales; empero, la de la izquierda parece mayor. El principio de asimilación se aplica a esta figura, lo mismo que a las precedentes. No obstante, se podría partir de un principio inverso y llegar a las mismas predicciones. Imaginemos que la percepción de las relaciones geométricas se altere en el sentido de un mayor contraste (principio del contraste): GH sería visto de mucho mayor tamaño con respecto a EF de lo que es en realidad. El segmento CD se vería agrandado, y el AB, empequeñecido, para mantener cierta coherencia. La explicación se extiende a otras figuras. Ahora bien, en la figura *e*, el principio de asimilación y el principio de contraste efectúan pronósticos contrarios. En esta figura, tres segmentos verticales adosados a arcos de círculo parecen curvos. Si tomamos el punto medio de un segmento y uno de sus extremos, y comparamos sus distancias a los puntos correspondientes de los arcos, en la misma horizontal, tales relaciones resultan amplificadas, de conformidad con un principio de contraste.

JACQUES NINIO

imagen y bastante a la izquierda (*véase la figura 1*).

Hay multitud de imágenes, en especial, fotos de paisajes montañosos, graderíos y huellas, que se prestan a una inversión del relieve. En cuanto lo fotografiado sea una superficie para la cual la profundidad —o la elevación, si se trata de una foto desde abajo— sea una función continua de las coordenadas x e y del plano de la imagen, resulta fácil que se produzca una inversión de relieve, según queramos ver la imagen.

Las cosas se complican cuando se da una interposición y aparece sobre la imagen una línea de contorno que separa un objeto situado en primer plano de otro situado en el fondo en segundo plano. En este caso, cada punto del contorno corresponde a dos puntos de la escena, situados uno detrás del otro, a dos diferentes profundidades. Aquí, los índices de interposición se oponen a la inversión del relieve. A mi entender, las inversiones más interesantes son aquellas en las que, tras la inversión de sentido de la imagen, se produce una reorganización perceptiva que no se reduce a un cambio de signo de la profundidad (*figura 4*).

Apreciación de orientaciones

Con independencia del problema de la apreciación de la orientación exacta de una línea —si es posible, en el espacio— se requiere saber ya por dónde pasa la línea, lo que a veces resulta menos sencillo de lo que se cree. Comparemos un damero cuyas casillas estén alineadas verticalmente con el mismo damero tras haber sido girado 45 grados (*figura 5*). Se observará, para empezar, una ilusión clásica: la figura de la derecha parece mayor que la de la izquierda. Se presenta también otro efecto, que pocas personas señalan espontáneamente. A la izquierda, el damero se organiza según bandas horizontales o verticales, en las que se van alternando las casillas negras y las blancas, adosadas por los costados. La figura girada, sin embargo, se organiza en alineaciones de casillas, todas negras o todas blancas, unidas por los vértices. Esta modalidad de funcionamiento perceptivo, que separa el blanco del negro, es más frecuente que la primera, aunque se sabe de casos donde se da la cooperación de elementos de valor opuesto.

Abundan las ilusiones ópticas engendradas por los problemas de conjunción o disyunción de elementos blancos y negros. La más famosa es la ilusión de la espiral, descrita por Fraser en 1908 (*figura 2*). En esta figura, tanto arriba como abajo, los arcos blancos y negros contiguos forman círculos concéntricos. Ahora, en la imagen superior, los arcos parecen hallarse arrollados en espiral, mientras que en la inferior resulta la disposición en arcos concéntricos mucho más perceptible. ¿A qué se debe esta diferencia?

Los arcos negros, considerados por separado, se encuentran, por construcción, organizados en espiral. Otro tanto vale para los arcos blancos. Parece como si en la interpretación de la imagen superior, el cerebro disociase los arcos blancos de los negros, mientras que en la imagen inferior los tratara conjuntamente, integrándolos en una misma forma. La diferencia de construcción entre las dos imágenes se debe a que, en la superior, los arcos blancos se hallan sobre un fondo oscuro y los negros sobre un fondo claro, mientras abajo sucede a la inversa. El valor del contraste local decide, según el caso, la separación o la unión de lo blanco y lo negro. Los errores de orientación se observan en numerosos motivos, que son, casi siempre, motivos visualmente cargados con redes de líneas paralelas o que tienen orientaciones parecidas (*figura 6*).

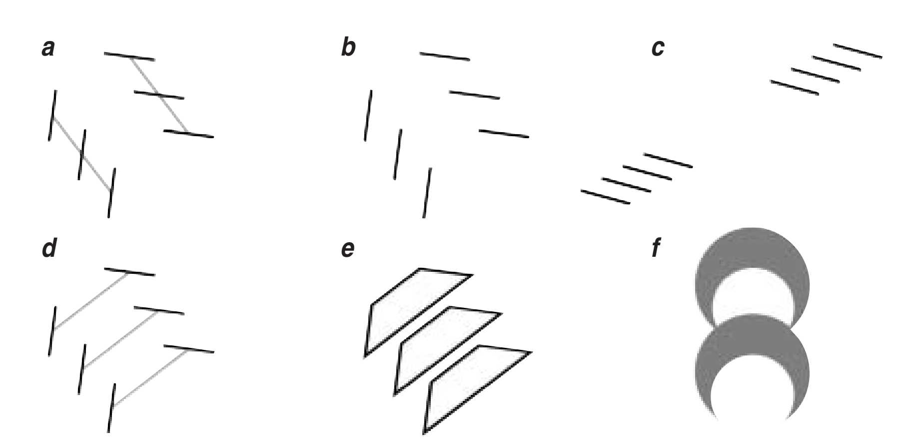
Ilusiones de geometría pura

Incluso los dibujos de extrema simplicidad pueden ocasionar errores de apreciación, que afectan a la orientación de líneas, su alineación y su curvatura o a las relaciones de dimensión entre diferentes partes de una figura (*figuras 9-13*). El campo es muy amplio; con un poco de sentido de la observación se aprecian por doquier ilusiones geométricas; con imaginación, se las crea en profusión. Podemos distinguir dos niveles de explicación.

En el plano de la función desempeñada, está claro que el cerebro levanta sus planos geométricos y construye sus representaciones atendiendo a un "pliego de condiciones". Los procedimientos que podría utilizar, aun siendo perfectamente legítimos y fiables en situaciones naturales, producen sin embargo resultados no deseados en el caso de las figuras artificiales denominadas "ilusiones geométricas". Para Richard Gregory, que ha sistematizado ideas del siglo XIX, en los dibujos se dan ciertos motivos, típicos de configuraciones presentes en las imágenes en perspectiva, donde dichos motivos proporcionan indicaciones de profundidad.

Si los mecanismos responsables de la constancia del tamaño tomasen en consideración tales indicios, tendrían por efecto agrandar o reducir ciertas figuras geométricas, según que conllevaran uno u otro motivo, incluso cuando no fuese aplicable la perspectiva. En este mismo orden de ideas generales, Mark Changizi, de la Universidad Duke, ha propuesto que, dado que al caminar normalmente somos nosotros quienes avanzamos hacia los objetos, y dado que los cálculos geométricos son demasiado lentos, el cerebro introduciría factores de corrección que se anticiparían a las relaciones geométricas que se percibirían una fracción de segundo más tarde.

No se conoce ningún mecanismo neuronal capaz de dar cuenta de las ilusiones geométricas. Se ignoran, por ejemplo, los fundamentos de la apreciación del paralelismo (tarea que el cerebro realiza a la perfección) y carecemos de ideas verosímiles sobre el modo en que se representan los puntos en el cerebro. El punto es una entidad elemental en la geometría euclídea. Ahora, si nos ceñimos a la ortodoxia neuronal del momento, un punto constituye una entidad sumamente compleja, representada en el cerebro por la superposición de un gran número de entidades del tipo de ondículas.

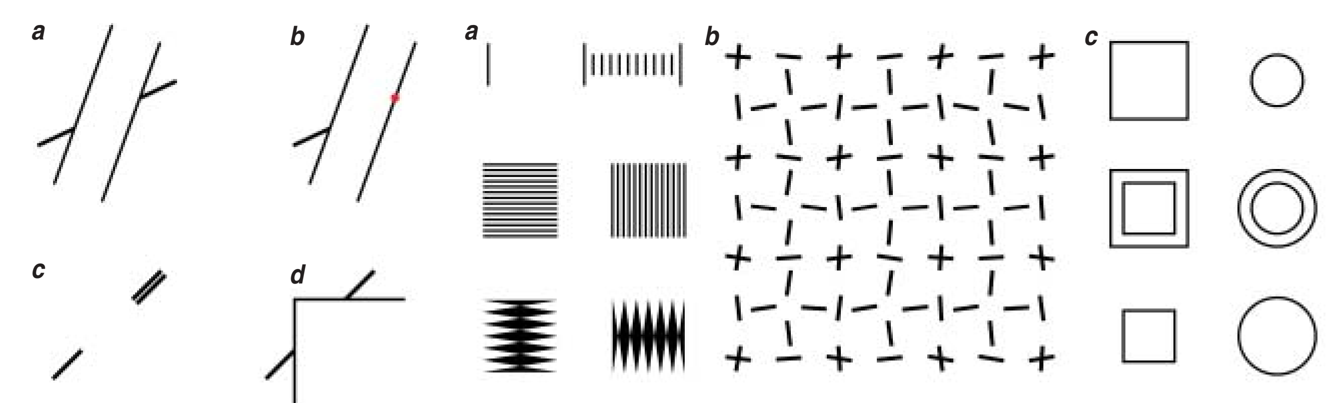


10. ILUSION DE ZÖLLNER. Los bloques de tres segmentos paralelos parecen separarse por arriba y aproximarse por abajo (*a*). La ilusión se aprecia de forma atenuada al eliminar los ejes (*b*). En cierta variante (Ninio y O'Regan), dos bloques idénticos no parecen ser la prolongación exacta uno de otro (*c*). El desplazamiento percibido en esta ilusión se encuentra muy próximo del percibido en la configuración *a*, lo que indica que la ilusión de Zöllner no puede justificarse en términos de repulsión entre dos bloques simétricos. Se podrían invocar los efectos de una rotación individual de los bloques o de una transformación de tipo de cizalladura, que harían deslizarse las barritas en el sentido de la formación bloques más rectangulares; o, incluso de un efecto de acordeón: una ampliación en una dirección perpendicular a las barritas. Según otra interpretación, la ilusión de Zöllner sería testimonio de una tendencia a acercar a 90 grados el ángulo que forman las barritas y la gran barra mediana. ¿Por qué habría entonces la ilusión de ir en el mismo sentido en la variante *d*? En la ilusión de los trapecios (*e*), el trapecio central parece mayor que el situado bajo él, pero menor que el suprayacente. Los lados oblicuos de los trapecios forman una configuración de tipo Zöllner y la ilusión de los trapecios va en el sentido pronosticado por la de Zöllner. El principio según el cual una forma que engloba habría de parecer mayor que la forma englobada se ve refutado en la ilusión de las medias lunas (*f*). La media luna englobante situada por encima parece menor que la englobada, situada bajo ella. Esta ilusión se explica, en cambio, si la interpretamos como una ilusión de Zöllner relativa a las puntas de las medias lunas.

JACQUES NINIO

Se podría esperar, cuando menos, una explicación de las ilusiones a través de un mecanismo formal, sin intervención neuronal. Suele justificarse la ilusión de Müller-Lyer por un mecanismo de asimilación (como en los efectos de inducción coloreada, cuando un color, que ocupa una pequeña superficie, es atraído hacia los colores de las superficies vecinas). Por ejemplo, en la figura 9, el segmento AB se vería menor que el CD, resultado de la contracción de AB por la presencia vecina de EF. Por mi parte, yo asocio la ilusión de Müller-Lyer a un efecto radicalmente opuesto: un gran número de ilusiones geométricas reflejan una tendencia a exagerar los contrastes. Cuando un segmento es realmente mayor que otro (aquí, GH en comparación con EF), el cerebro tendería a aumentar la relación de sus tamaños. En la ilusión de Müller-Lyer, la causa motriz consistiría en que la representación de GH sería demasiado grande con relación a EF. Entonces CD resultaría dilatado, y AB, contraído, para preservar la forma de los motivos (en detrimento de la exactitud de las longitudes). Esta explicación por contraste parece, a primera vista, más complicada que la explicación por asimilación; tiene en cambio el mérito de unificar numerosos efectos, que desbordan el campo de las variantes de Müller-Lyer.

El anterior tipo de análisis cabe aplicarlo a numerosas ilusiones. Se



11. ILUSION DE POGGENDORF. Se ilustra la ilusión en su forma clásica (*a*). Los dos segmentos incidentes en las paralelas están alineados, pero el de abajo, si se prolonga mentalmente, parece alcanzar a la otra paralela un poco por encima de la unión con el otro segmento. El error de puntería hacia el punto rojo es todavía mayor en la variante con un solo segmento (*b*). En otra variante (*c*), existe una tendencia a ver el segmento de la izquierda alineado con el más bajo de los segmentos a su derecha, mientras que su alineación es con el superior. Por último, en la variante en esquina (*d*), dos segmentos se prolongan, pero no parecen tener la misma orientación. Estas variantes, y algunas otras, parecen quedar bien descritas por adición de dos efectos: un efecto menor de desplazamiento observado en las líneas grandes, como el indicado en la figura *c*, y una tendencia a hacer que los ángulos difieran de 90 grados en menos de lo que lo hacen realmente. Esta tendencia resulta evidente en la variante *d*, pero en ella sería compensada por los dispositivos de apreciación del paralelismo. En las otras figuras, un eventual error angular explicaría el error de puntería; no entraría en conflicto con la apreciación del paralelismo. El mayor vigor de la ilusión en la variante de un segmento que en las demás variantes conocidas con dos segmentos podría obedecer a la intervención en las variantes de dos segmentos de dispositivos detectores de la alineación de segmentos.

12. SUBDIVISIONES. Cuando una figura se halla finamente subdividida, experimenta un efecto de expansión en una dirección perpendicular a las líneas de subdivisión. En el dibujo de arriba (*a*), la parte subdividida parece ilusoriamente mayor que la parte vacía. Debajo, los bloques son iguales dos a dos, pero parecen alargarse en la dirección perpendicular a las divisiones. En la imagen central (*b*), con motivos divididos en dos, se produce el efecto inverso: los dos brazos de la cruz tienen la misma longitud que las agujas aisladas, pero parecen menores. En la ilusión de Delboeuf (*c*), existe un equilibrio delicado: los cuadrados y los círculos subdivididos parecen ilusoriamente menores que los cuadrados grandes o los círculos aislados, en tanto que los cuadrados o los círculos internos parecen ilusoriamente mayores que los círculos pequeños o los cuadrados aislados.

JACQUES NINIO

dice a veces que la ilusión de Zöllner se debería a la repulsión de los dos bloques simétricos. O bien, que resultaría de una tendencia a la ortogonalidad, que hace ver los ángulos más cercanos a 90 grados de lo que realmente son.

Sin embargo, la ilusión podría reflejar igualmente un efecto de cizalladura o un efecto de expansión ortogonal a las barritas: se tendría una tendencia a agrandar en una dirección perpendicular a las barritas. Mediciones cuidadosas efectuadas en la Escuela Normal Superior con Kevin O'Regan, del Laboratorio de Psicología Experimental de la Universidad París 5, indican que la variante expuesta en la figura 10c, en la que se prolongan dos bloques idénticos, proporciona en todas las orientaciones, cuantitativamente, el mismo valor de ilusión que el motivo de Zöllner propiamente dicho. La explicación por repulsión no es aplicable a esta variante. La correspondiente a la tendencia a ortogonalidad resulta demasiado poco predictiva, pues no dice qué es lo que debe girar para agrandar los ángulos pequeños. La explicación de una expansión ortogonal de las barritas unifica numerosos efectos.

Principios de interpretación

Con mayor generalidad, se plantea el problema de la reducción de las ilusiones geométricas a un pequeño haz de principios. Con tal propósito, recopilo, con toda la precisión posible, datos relativos a la forma en que cada ilusión varía con la orientación. Ciertas ilusiones son casi isotrópicas, otras presentan efectos máximos a ±45 grados con respecto a la horizontal, otras culminan hacia los ±22 o los ±67 grados y las hay que poseen un "perfil de orientación" más complejo todavía. El estudio de estas relaciones contribuirá al establecimiento del grado de parentesco entre las distintas ilusiones y permitirá, con ello, acceder a sus componentes esenciales.

En ocasiones, los efectos se suman; en otras, se manifiestan de manera independiente, según la forma de considerar la figura. A veces, afloran efectos jerárquicos, como sucede en el caso de que una ilusión resulte atenuada debido a que una indicación de alineación o de paralelismo permite corregir el error.

Dos operaciones de primer orden serían el soporte de las ilusiones geométricas. La primera guarda relación con las orientaciones que son "anamorfoseadas" por la perspectiva, al producirse compensaciones automáticas de tendencia contraria a las anamorfosis de la perspectiva. Así sucedería en las ilusiones de orientación; en especial, en la de Zöllner.

Concierne la segunda operación al aspecto métrico: los errores relativos a las razones de dos longi-

13. ¿CONTRASTE O NORMALIZACION? Los círculos situados en el centro de las constelaciones de lo alto son iguales (*a*), pero el de la izquierda, que está rodeado de círculos grandes, parece menor que el de la derecha, circundado por círculos pequeños. El mismo efecto se observa con cuadrados o con figuras subjetivas (*b*). Volvemos a hallar el efecto, en forma atenuada, en las figuras de la parte inferior (*c*), construidas de manera que las acciones se ejerzan en una sola orientación; en este caso, la horizontal. Un principio de asimilación (tamaño percibido "atraído" por el tamaño de las formas vecinas) pronosticaría efectos inversos de los que se observan aquí. Un principio de contraste (la tendencia a exagerar los contrastes) iría en este caso en el sentido correcto. No obstante, al autor le parece que la interpretación idónea sería un principio de normalización, que tendería a magnificar globalmente las figuras pequeñas y a disminuir las grandes mientras que el contraste podría actuar en el interior de las constelaciones. Este principio daría buena cuenta de la separación de los ápices de los triángulos en la figura inferior derecha.

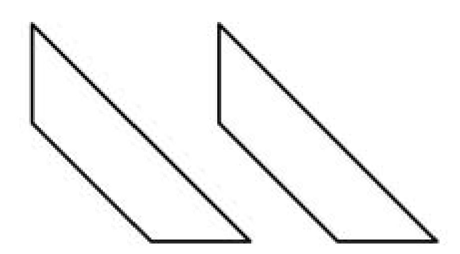
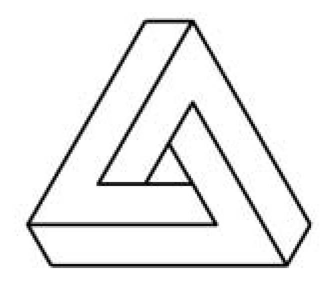
tudes (por ejemplo, en la ilusión de Müller-Lyer). El problema consiste en conciliar la geometría dada por una "toma" a "ojo fijo", que obedece a las leyes de la perspectiva, y las tomas de una exploración por la mirada, que no las obedecen.

Cuando vemos, no advertimos la vía por la que hemos adquirido la información: toma con ojo fijo, cuerpo fijo y movimiento exploratorio de los ojos o, incluso, extracción en el curso de un movimiento, por modificaciones del flujo visual. Pasamos de un modo a otro sin apreciar en la imagen modificación geométrica alguna. Todo acontece como si los "procesadores neuronales" nos proporcionasen respuestas idénticas. El auténtico problema de la extracción de información consiste en poner todas las informaciones en formatos compatibles, para contrastarlas sin discontinuidades durante la percepción. De esta necesidad de compatibilidad emana la necesidad de que cada categoría de datos reciba una "ayudita" de armonización con lo que se espera de los demás canales.

Toda imagen podría, en principio, interpretarse de infinidad de formas. En efecto, un punto de una imagen podría ser representación de todo punto del espacio situado en el rayo visual que va desde el ojo hasta ese punto. Si, por ejemplo, observo un círculo desde el plano que lo contiene, la información recibida se reduce a un segmento. Recíprocamente, este segmento podría representar un segmento rectilíneo del espacio, un círculo o cualquier curva en el plano. Ahora bien, en los dibujos, un segmento se interpreta, casi siempre, como la proyección de un auténtico segmento. La elección de la interpretación no está guiada por la sencillez, sino por el principio de "genericidad".

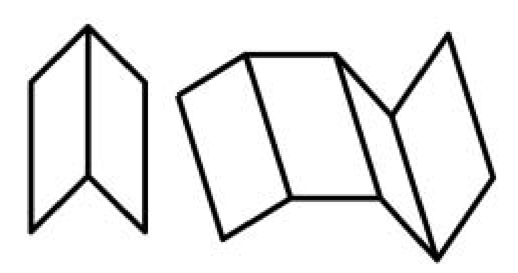
En virtud de este principio, las regularidades y las coincidencias que presenta una figura no se perciben como meros accidentes, tributarios de un punto de vista muy particular, sino como reflejo de propiedades verídicas del objeto. Han de ser, por consiguiente, estables con respecto a los cambios de punto de vista. La proyección de un segmento será, casi siempre, un segmento; pero, excepcionalmente, puede constituir un punto. Un círculo, en cambio, no se proyecta como un segmento sino en direcciones muy particulares de la mirada.

El principio de genericidad está atemperado por la voluntad de otorgar, siempre que sea posible, una interpretación tridimensional a todo dibujo (el contorno de un jarrón se interpretará como un jarrón y no como un corte plano en forma de jarrón). Los dos trapecios a la izquierda de la figura 14 ilustran de manera inesperada un caso donde la tendencia a la interpretación tridimensional se impone al principio de genericidad. Este opera también en los "objetos imposibles", como la triple viga de Penrose. Nada impide que un objeto real del espacio se proyecte según el croquis de la triple viga (la construcción de tal objeto es posible, es un clásico de los museos de ciencias), pero nuestro cerebro, fiel al principio de genericidad, interpreta el dibujo suponiendo que: *(1)* las líneas rectas

14. DIBUJOS AMBIGUOS. A la izquierda, no se ve, al principio, más que dos trapecios planos. Pero es posible otra interpretación. Cabe verlos como cintas retorcidas, giradas hacia atrás por los lados verticales y hacia delante por los horizontales. La triple viga de Penrose (*a la derecha*) constituye uno de los grandes prototipos de "figuras imposibles". Tres vigas de sección cuadrada parecen ensamblarse dos a dos formando ángulos rectos, cosa imposible. Pero sí se podrían concebir objetos con torsión en el espacio, que, desde cierto punto de observación, serían representables por la figura de la derecha. La triple viga de Penrose es imposible en tanto se sigan los convenios habituales en dibujo, es decir, al suponer que las vigas son rectas, están ensambladas y son perpendiculares.

JACQUES NINIO

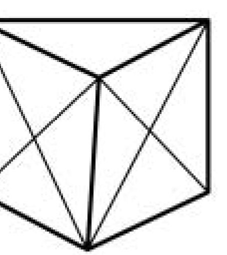
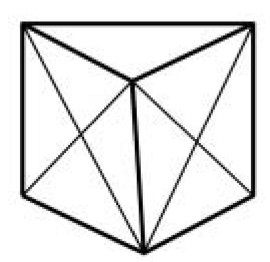
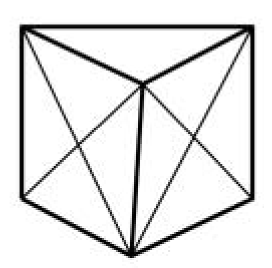


15. ORIENTACIONES EN EL ESPACIO. El diedro de Mach (*izquierda*) podría esquematizar un libro abierto, apoyado verticalmente sobre los bordes de la cubierta, o bien el techo de una tienda de campaña. De igual forma, suele interpretarse que las aristas pegadas de los cuatro paneles de la derecha son horizontales. Pero también es compatible con la geometría espacial que esas aristas se levanten casi verticalmente. Es difícil representar con un dibujo esta configuración, propuesta por Leonid Kontsevich.

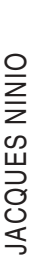
del contorno del dibujo se corresponden debidamente a bordes rectilíneos del objeto; *(2)* las ternas de segmentos paralelos corresponden a vigas paralelepipédicas; *(3)* las vigas están ensambladas dos a dos y conectadas en ángulo recto. La triple viga no es imposible, sino en la medida en que se aplican a los tres vértices los convenios habituales de interpretación de los dibujos.

En un dibujo, una línea vertical podría representar una vertical auténtica, pero también una recta horizontal que arranca justo delante de nosotros y se dirige directamente hacia el horizonte. Así lo pone de manifiesto un croquis en el que dos paralelogramos adyacentes pueden representar, ya un libro abierto en posición vertical, ya el techo de una tienda.

Mas el cerebro no carece de recursos para enfrentarse a los problemas de ambigüedad en la apreciación de orientaciones en el espacio. A decir verdad, los resuelve con brío, haciendo intervenir la visión estereoscópica. Cuando un objeto se nos ofrece desde dos diferentes puntos de vista, resulta posible, por comparación de las dos vistas planas, deducir de ellas su forma tridimensional. En la visión se cuenta, en primera aproximación, con las proyecciones en las dos retinas, tomadas a través de dos pupilas separadas entre seis y siete centímetros. En visión estereoscópica, los cálculos se efectúan fuera de la conciencia, en una fracción de segundo, incluso con estereogramas bastante complejos. Con el estereograma de la figura 16 vemos, en cada una de las imágenes, una forma que interpretaríamos, salvo que fuésemos exquisitos geómetras, como un prisma de caras planas. Ahora bien, al menos una de las caras de cada prisma está plisada. Para quienes saben apreciar el relieve en los estereogramas, el aspecto plisado les salta a la vista, sin esfuerzo de reflexión. Nuestro cerebro inconsciente revela ser mejor geómetra que nuestro cerebro cultural.

16. ¿PLANOS O TETRAEDROS? A primera vista, las tres imágenes representan prismas de caras planas. Pero si en uno de estos prismas la arista casi vertical mediana estuviera a la vez en un mismo plano que la arista vertical de la izquierda y en un mismo plano que la arista vertical de la derecha, tal arista debería cortar a cada una de estas dos aristas en sendos puntos que se hallarían contenidos en el plano posterior del prisma. La arista mediana se encontraría, pues, enteramente contenida en este plano y el objeto representado no tendría volumen. La visión estereoscópica tiende este tipo de trampas. Utilizando la visión estereoscópica y fundiendo la figura central, sea con la de la izquierda, sea con la de la derecha, vemos inmediatamente que las caras delanteras del prisma ya no son planas: forman tetraedros. (A quienes no logren ver los estereogramas, las figuras coloreadas les darán una idea de esta profundidad.)



El autor

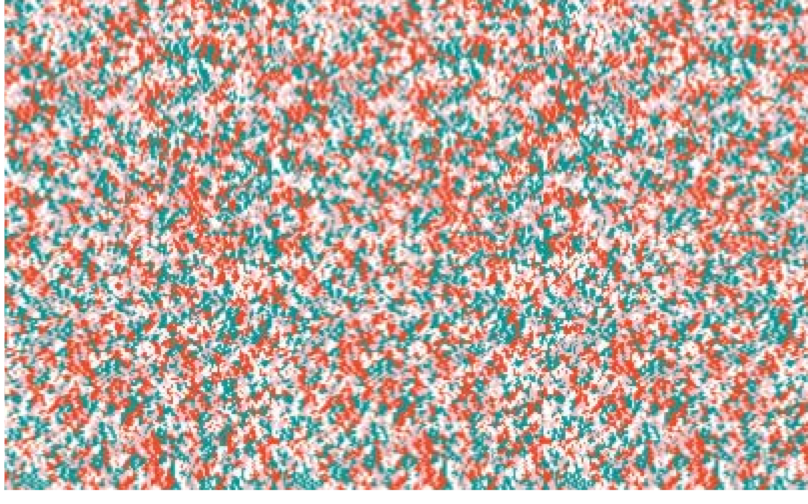
JACQUES NINIO, adscrito al Laboratorio de Física Estadística de la Escuela Normal Superior, viene estudiando las ilusiones ópticas desde hace 25 años.

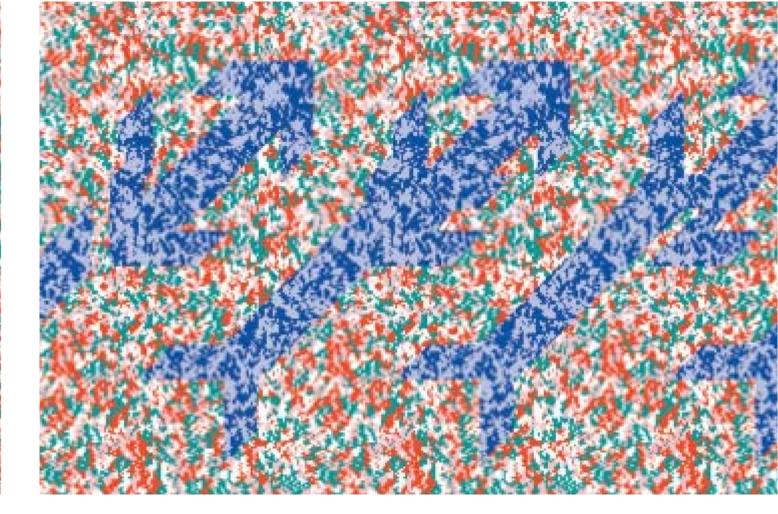
Se ha hablado con mucha frecuencia de "ilusión de relieve" al referirse al efecto producido por los estereogramas. Cuando se descubrieron estereogramas en una imagen, hace un decenio, se reputaron imágenes mágicas. Estas imágenes se calculan por medio de un estricto algoritmo; de haber magia, se encuentra en la facilidad con la que el cerebro extrae la forma tridimensional. Se conocen, empero, algunas paradojas de la visión estereoscópica, pudiéndose hablar a su respecto de "ilusiones estereoscópicas". De todos modos, estas ilusiones no entrañan ninguna idea general novedosa.

El mecanismo de la demostración

Cada vez que se descubre un nuevo efecto visual, se plantea la cuestión del lugar de su nacimiento. ¿Se produce en la retina? Una de las formas de responder consiste en construir una imagen estereoscópica en la cual el estímulo generador del efecto ilusorio no se halla presente en ninguna de las dos retinas; no toma cuerpo hasta después de la extracción de la estructura tridimensional. Así se ha hecho, por ejemplo, en el autoestereograma de la figura 17 izquierda, en el que aparece la figura de Müller-Lyer en tres dimensiones, que es percibida por visión estereoscópica, mientras que, vista en dos dimensiones, queda completamente enmascarada. De esta diferencia se deduce que la ilusión no ha nacido en la retina, sino que se ha constituido con posterioridad al estadio en que se combinan los flujos visuales procedentes de las dos retinas. Se pueden descartar así, por no retinianas, casi todas las ilusiones visuales conocidas.

Se puede demostrar también que, en la mayoría de las ilusiones, no se



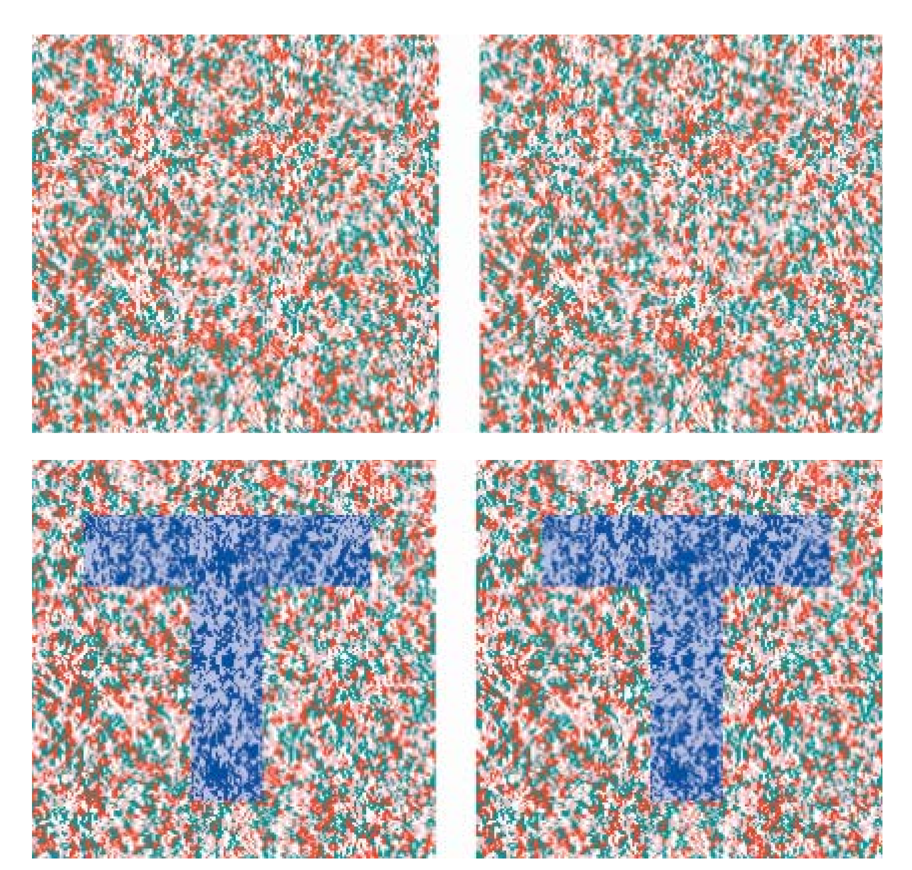


17. ILUSION DE MÜLLER-LYER en autoestereograma. En visión estereoscópica vemos emerger la figura de Müller-Lyer, que no se distingue en el estereograma de la izquierda. La ilusión está presente; ello sugiere que cobra vida bastante tardíamente en el tratamiento de la información visual, después del estadio en el que se combinan en el cerebro las informaciones procedentes de los ojos. La imagen de la derecha torna explícita la codificación de la forma en el estereograma. Los motivos de Müller-Lyer aparecen en ella en dos ejemplares en azul, en la parte central. Las "copias" en azul que vemos a uno y otro lado forman parte del fondo. En visión estereoscópica veremos, pues, que los motivos en azul se despegan de un fondo que contiene también motivos azules.

requieren los movimientos de los ojos: los efectos son igualmente observables cuando las imágenes se iluminan por un destello o flash, que no concede a los ojos tiempo para moverse. Se observan, asimismo, en el caso de "imágenes estabilizadas", proyectadas sobre la retina por un dispositivo que, fijado a la córnea, ocupa una posición fija con respecto a la retina, cualesquiera que sean los movimientos de los ojos.

¿Tendrán relación las ilusiones geométricas con nuestra cultura y nuestro ambiente urbano, que privilegian las líneas rectas y los ángulos rectos? Antropólogos que han viajado hasta tribus africanas han informado que la sensibilidad a las ilusiones geométricas sería en ellas bastante distinta de la sensibilidad de los occidentales. No obstante, estos trabajos, realizados sin excesivo rigor, no merecen la resonancia que se les ha dado. En el otro extremo, se publican a menudo en las mismas revistas mediáticas artículos según los cuales tal o cual animal —en cierta ocasión, el caballo, en otra, la mosca— sería sensible a las mismas ilusiones geométricas que nosotros.

Lo que realmente importa, sin embargo, no consiste en saber si las ilusiones se experimentan con mayor fuerza en unos u otros, sino la comprensión, por medio de estas paradojas en la percepción de formas, del principio de los procesos neuronales que nos proporcionan tan finos diagnósticos sobre las alineaciones, el paralelismo, la curvatura, las dimensiones y la geometría en el espacio.



18. ILUSION DE LA "T" EN ESTEREOGRAMA DE DOS IMAGENES, para visión cruzada. Al fundir, en visión cruzada, las imágenes de lo alto, se verá la forma en T, explícitamente representada en las imágenes de la parte baja. La ilusión consiste en que la barra horizontal parece ser más corta que la barra vertical.

JACQUES NINIO

Bibliografía complementaria

L'OEIL QUI PENSE. VISIONS, ILLUSIONS, PERCEPTIONS. Roger Shepard. Seuil; París, 1992.

LA SCIENCE DES ILLUSIONS. Jacques Ninio. Odile Jacob; París, 1998.





El episodio de impacto de Chicxulub

El impacto que aniquiló los dinosaurios desencadenó una oleada de incendios que arrasaron los bosques de la Tierra

David A. Kring y Daniel D. Durda

Se acepta que fue el impacto de un asteroide o un cometa lo que acabó de forma brusca con la era de los dinosaurios. Pero desconocemos de qué forma esos reptiles y otras muchas especies se extinguieron. Ignoramos también cómo consiguieron los ecosistemas recuperarse. El cataclismo en cuestión superó de lejos los azotes regulares que sufren los organismos, de los que deben recuperarse. El cuerpo celeste atravesó el cielo a más de 40 veces la velocidad del sonido. Era tan enorme, que cuando su extremo anterior pegó contra el suelo, su extremo de cola se hallaba por lo menos a la altura de crucero de un avión comercial. Produjo una explosión equivalente a 100 billones de toneladas de TNT: la mayor liberación de energía que nuestro planeta ha experimentado en los 65 millones de años transcurridos desde entonces.

Los restos de aquella colisión permanecen enterrados bajo la selva tropical del Yucatán, las ruinas mayas de Mayapán, el pueblo costero de Progreso y las aguas del golfo de México. El cráter, denominado Chicxulub en homenaje a los pueblos mayas de la región, alcanza unos 180 kilómetros de diámetro. Lo rodea una falla circular de 240 kilómetros de diámetro, producida, según parece, con la reverberación cortical subsiguiente al impacto.

El asteroide o cometa destruyó un mundo y abrió paso a otro. La investigación reciente sugiere, sin embargo, que el impacto no eliminó las especies de manera directa o inmediata. Antes bien, desencadenó una serie de efectos ambientales asoladores y complejos que extendieron la devastación por todo el planeta. Una de las fuerzas más destructivas fueron los enormes incendios forestales que arrasaron continentes enteros. El fuego aniquiló hábitats críticos, destruyó la base de las cadenas alimentarias continentales y contribuyó a una suspensión global de la fotosíntesis.

Horno asador

Las huellas de esta muerte en masa resultan visibles en varios afloramientos rocosos del oeste de los Estados Unidos, de Europa meridional y de otras regiones. Merece mencionarse, por su interés geológico y paleontológico, la cuenca Ratón, en Colorado y Nuevo México. Entre los estratos rocosos del Cretácico y los del Terciario, se intercala un horizonte de arcilla, de un centímetro de potencia, entreverado con elementos exóticos. Estudiando dicha franja en diversos lugares del planeta, el grupo dirigido por Wendy S. Wolbach, de la Universidad DePaul, nos sorprendió en 1985 con el hallazgo de un componente extraño. Encontraron restos de hollín: partículas esféricas de carbón, a menudo agrupadas en racimos, cuya composición coincide con la del humo de los incendios forestales. La cantidad global de hollín asciende a unos 70.000 millones de toneladas: las cenizas del mundo del Cretácico.

La presencia del hollín se esgrimió como una prueba más de la naturaleza del agente de la extinción: un cuerpo celeste, no las erupciones volcánicas, cuyo efecto no habría sido tan brusco ni generalizado [*véase* "Causa de la extinción en masa: un impacto de un cuerpo extraterrestre", de Walter Alvarez y Frank Asaro; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre 1990]. En 1990, H. Jay Melosh, astrónomo de la Universidad de Arizona, avanzó, con su grupo, un modelo sobre el proceso mediante el cual un impacto pudo haber desencadenado incendios por todo el planeta. Al chocar con la Tierra, el cuerpo celeste se desintegró y vaporizó un pedazo de corteza terrestre, con la creación consiguiente de una pluma o penacho de escombros incendiarios. Con una velocidad acelerada, la pluma ascendió del cráter hacia la atmósfera, transportando cristales de cuarzo que, momentos antes, se encontraban a profundidades de hasta 10 kilómetros bajo la superficie.

El penacho creció. Llegó a alcanzar un diámetro de 100 a 200 kilómetros y después se expandió hasta envolver el planeta entero. Entonces, el material empezó a caer por gravedad, cortando la atmósfera casi con la misma energía con la que había sido lanzado al espacio desde Chicxulub. Precipitándose a velocidades de 7000 a 40.000 kilómetros por hora, las partículas iluminaron el cielo como billones de bólidos y caldearon un gran volumen de la atmósfera hasta varios cientos de grados. Por fin, se depositaron lentamente en el suelo y formaron la capa que vemos en la actualidad.

Según los cálculos de Melosh, esta lluvia de teas pudo haber quemado la vegetación que cubría buena parte del globo. Pero en 1990 nadie conocía todavía la ubicación ni el tamaño preciso del impacto, razón por la cual el equipo de Melosh no logró precisar la cantidad total de calor ni la distribución de los incen-

Los autores

DAVID A. KRING Y DANIEL D. DURDA se conocieron cuando ambos trabajaban en la Universidad de Arizona. Kring formaba parte del equipo que atribuyó el cráter de Chicxulub al impacto de un asteroide o cometa y lo relacionó con la extinción en masa de la transición del Cretácico al Terciario. Durda estudiaba la evolución de las colisiones y la dinámica de los asteroides. Elaboraron la secuencia de acontecimientos que siguieron al impacto. Kring permanece en Arizona; Durda trabaja ahora en el Instituto de Investigación del Sudoeste en Boulder.

Resumen/*Planeta en llamas*

- El impacto de Chicxulub causó la extinción en masa de la transición del Cretácico al Terciario, que acabó con los dinosaurios y más del 75 por ciento de las especies de animales y plantas terrestres. Queda, sin embargo, mucho por conocer sobre los incendios forestales de extensión planetaria que dicho episodio provocó.
- Cuando los escombros comburentes sobrecalentaron la atmósfera, la vegetación ardió en la mayor parte del planeta. Los animales no tenían hacia dónde huir. Los ecosistemas se desplomaron. El fuego constituyó un azote catastrófico sin par entre las calamidades ambientales generadas por el impacto.
- No todas las regiones sufrieron por igual. Muy al norte del lugar de impacto, sobrevivieron numerosas especies. A partir de esos núcleos, la vida repobló el planeta.

ALFRED T. KAMAJIAN (*Páginas anteriores*)

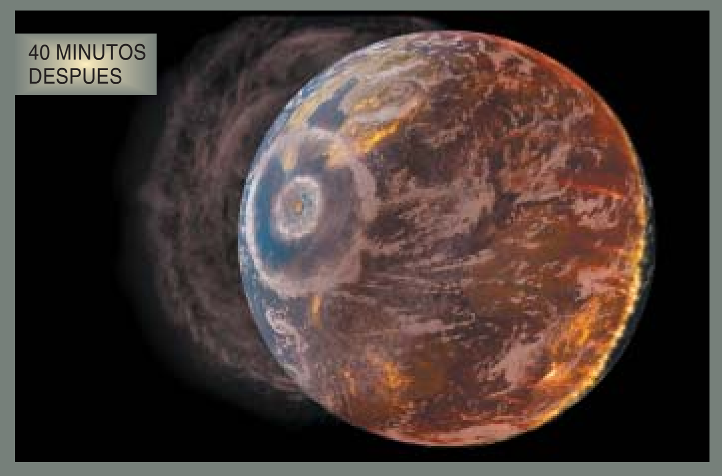
Colapso y recuperación del ecosistema



EN EL CRETACICO TARDIO, las ciénagas y los ríos de Norteamérica poseían una vegetación arbórea mezcla de coníferas y de planifolios perennifolios y deciduos. Formaban bosques de bóveda y bosques abiertos con sotobosques de helechos, plantas acuáticas y matorrales con flores.



EL IMPACTO DE CHICXULUB tuvo lugar en un mar somero. Inmediatamente, eyectó escombros rocosos, fundidos y vaporizados a la atmósfera. La mayor parte de estos restos se depositó en las regiones continentales cercanas, pero una cantidad considerable se elevó a gran altitud, hacia el espacio exterior.



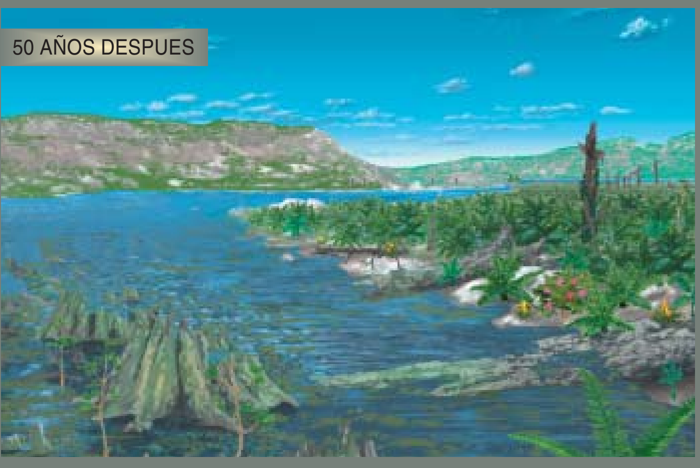
EL PENACHO rico en material vaporizado se expandió hasta recubrir el planeta. Cuando estos escombros regresaron al suelo, atravesaron la atmósfera convertidos en billones de bólidos, caldeándola en algunos lugares en cientos de grados.



TRAS LOS INCENDIOS, en el paisaje asolado sólo quedaron algunos troncos y esqueletos desnudos. Sobre el suelo se depositaron lentamente el hollín de los incendios y el polvo del impacto. La luz del sol se debilitó de manera espectacular, si no total, durante meses.

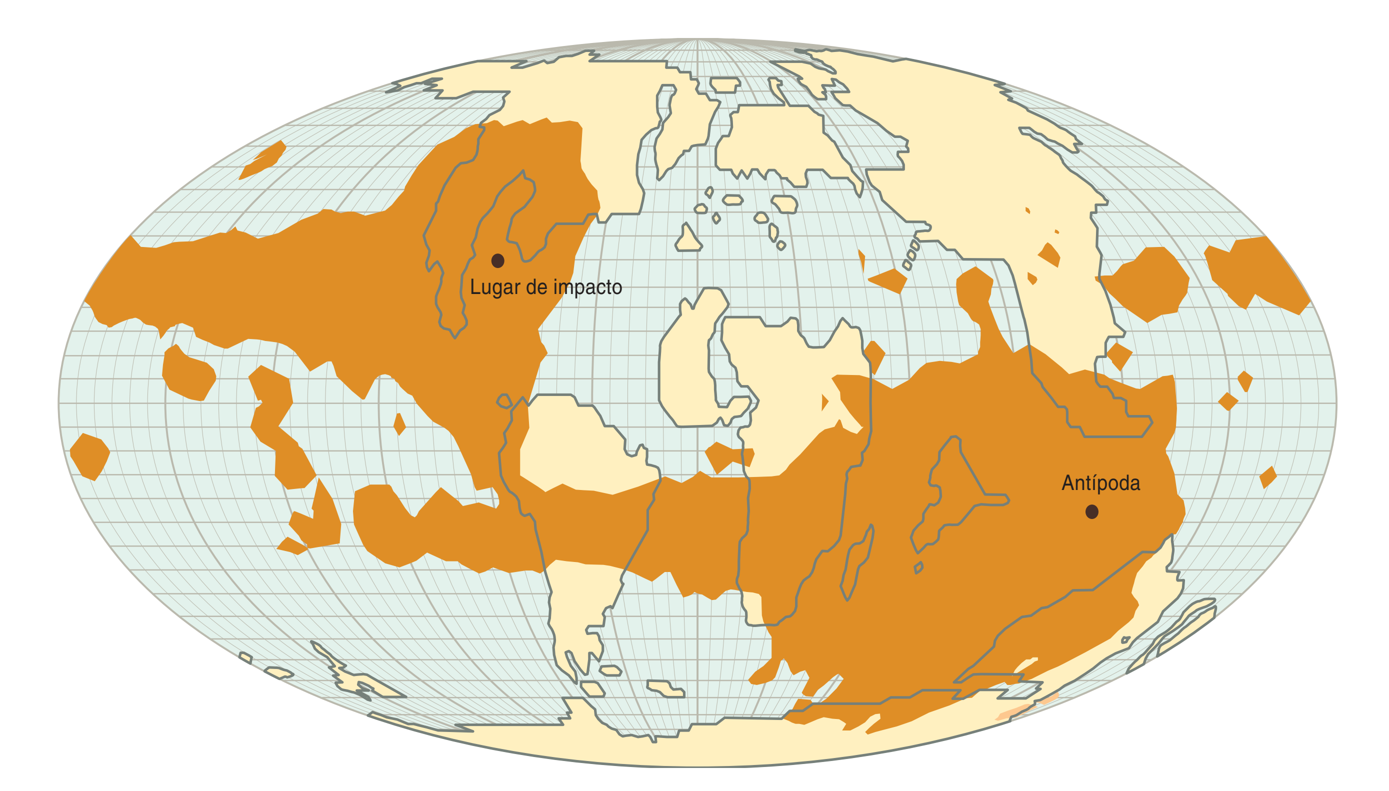


EL AMBIENTE POSTERIOR AL IMPACTO albergaba poca diversidad. Primero se recuperaron helechos y algas. Las especies vegetales de las ciénagas y de sus márgenes sobrevivieron por lo general mejor que las especies de otros ecosistemas. Entre las más perjudicadas, las coníferas.



LOS MATORRALES SE APROVECHARON del paisaje vacío y empezaron a cubrirlo. Las especies polinizadas por el viento tuvieron más éxito que las que necesitaban de insectos. Comenzaron a desarrollarse los árboles, pero la reconstitución de bóvedas arbóreas tardó decenios. No se puede afirmar a ciencia cierta cuánto tiempo duró la recuperación.

CHRIS BUTLER



1. UN PLANETA ABRASADO. Para desecar las plantas y prenderles fuego se requieren 12.500 watt de calor por metro cuadrado durante al menos 20 minutos. Dichas condiciones se alcanzaron en dos áreas principales, centradas en Chicxulub y en su antípoda, la India. Desde estas regiones, se avivaron corredores de fuego hacia el oeste, a medida que la Tierra rotaba bajo una lluvia de escombros que reingresaban en su atmósfera. Esta simulación por ordenador supone una determinada configuración del impacto; en otros modelos teóricos las áreas incineradas resultan todavía mayores.

FUENTE: DAVID A. KRING Y DANIEL D. DURDA; LAURIE GRACE (*ilustración*)

dios. Si bien el hollín se había encontrado por todo el planeta, no era necesario que el fuego se hubiera producido en todas partes; el viento pudo haber transportado el hollín a otros lugares.

Lluvia azul

Poco después de que Melosh publicara su estudio, un grupo de siete científicos (procedentes de Estados Unidos, Canadá y México), entre los que figuraba uno de los autores (Kring), descubrió que el cráter de Chicxulub constituía el lugar del impacto. Este hallazgo zanjó el debate sobre la causa determinante de la extinción. Desde entonces, la investigación se ha centrado en los pormenores del acontecimiento.

En 2002 terminábamos otro estudio sobre los incendios forestales. Conocer la ubicación del impacto nos permitió reconstruir las trayectorias y la distribución del material expulsado desde el cráter y evaluar la extensión de los fuegos. De acuerdo con nuestros cálculos, parte de los escombros llegó a medio camino entre la Tierra y la Luna antes de volver a caer sobre nuestro planeta. A los cuatro días, casi todo el material había regresado a la Tierra. Poco más del 10 por ciento escapó de la gravedad terrestre. Salió disparado por el sistema solar, para terminar aplastado, posiblemente, contra otros planetas. (De forma parecida arribaron a la Tierra fragmentos procedentes de Marte y la Luna, si bien mediante un proceso de eyección diferente.)

Los fragmentos de corteza que volvieron a penetrar en la atmósfera terrestre la caldearon tanto que desencadenaron incendios forestales en las regiones meridional y central de Norteamérica, central de Sudamérica, central de Africa, el subcontinente Indio y el sudeste de Asia (que, debido a la deriva continental, se encontraban en posiciones distintas de las actuales). En función de la trayectoria del cuerpo celeste (asteroide o cometa) que impactó, los incendios pudieron asolar, asimismo, otras zonas de estos continentes y, quizá, también Australia, la Antártida y Europa.

La peor parte se la llevaron Chicxulub y la India, que hace 65 millones de años se hallaba en sus antípodas y se convirtió, pues, en punto focal de los residuos comburentes. En las horas y días que siguieron, la rotación terrestre transportó las masas continentales hacia el este, situándolas bajo la lluvia de material eyectado. Así, la oleada de ignición de incendios forestales se desplazó hacia el oeste, reduciendo lentamente su intensidad.

En la mayoría de los casos, no importaba demasiado si la vegetación crecía en un lugar seco o húmedo. Las temperaturas elevadas duraron tanto tiempo que, igual que la leña en un horno, la vegetación se secó y terminó por arder. ¿Se asustaron los animales cuando el cielo empezó a fulgurar con la lluvia de escombros? ¿Se alarmaron ante la subida de la temperatura? ¿Permanecieron quietos o, por el contrario, empezaron a correr en alguna dirección, hacia el agua, por ejemplo? Por su fortuna, la mayoría de ellos debieron caer inconscientes cuando el calor se hizo insoportable. Posiblemente nunca llegaron a sentir el fuego abrasador de matorrales y árboles que les rodeaban.

PARQUE CRETACICO

DURANTE EL CRETACICO TARDIO, inmediatamente antes de que un cuerpo celeste (asteroide o cometa) chocara contra la Tierra, hace 65 millones de años, el clima era más cálido que ahora. No había casquetes polares. Algunos dinosaurios llegaron, en su migración septentrional, hasta la actual Alaska y, en su avance meridional, hasta las islas Seymour de la Antártida. Un brazo de mar atravesaba Norteamérica; unía el golfo de México con el océano Artico. Entre los ecosistemas cretácicos se encontraban desde humedales hasta bosques deciduos. Los paleobiólogos han cartografiado dichos ecosistemas en Norteamérica, donde los sedimentos continentales que contienen fósiles se conservan bien. (Se conoce poco sobre la vegetación de otras partes del mundo en las postrimerías del Cretácico.)

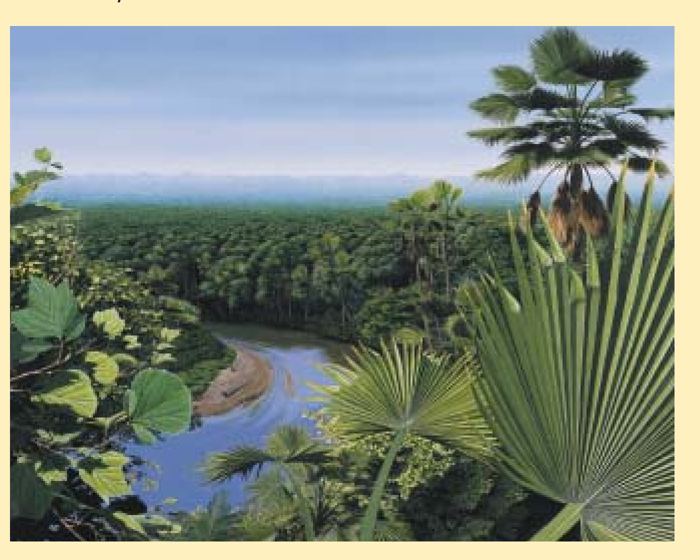
En lo que constituye hoy el sur de Colorado y norte de Nuevo México, serpenteaban ríos meandriformes desde las nacientes montañas Rocosas hasta una llanura de la costa oriental. Charles L. Pillmore y su equipo, del Servicio de Inspección Geológica de EE.UU. (SGEEUU), han cartografiado varios marcos sedimentarios; entre ellos, canales fluviales, depósitos de ribera, llanuras de inundación y pantanos. Fundado en hojas fósiles de dichos sedimentos, Jack Wolfe y Garland Upchurch, también del SGEEUU, han demostrado que la vegetación estaba dominada por árboles planifolios perennifolios casi tropicales que formaban un bosque de bóveda abierta.

Donde actualmente se encuentran las dos Dakotas, Kirk R. Johnson, del Museo de la Naturaleza y la Ciencia de Denver, ha encontrado hojas fósiles que sugieren que la vegetación consistía en un bosque dominado por angiospermas (plantas con flores), en su mayoría árboles pequeños (del tamaño del cornejo) a medianos (del tamaño de un álamo). Wolfe y Upchurch aducen que las condiciones eran más húmedas cuanto más al norte, lo que permitía un bosque planifolio perennifolio. Este bosque era más denso y con la bóveda probablemente cerrada en ciertas áreas. Algunas trepadoras poseían hojas anchas con puntas de goteo por las que el agua se escurría.

Arthur Sweet y sus colaboradores, del Servicio de Inspección Geológica del Canadá, han demostrado que, en contraposición con las plantas con flores que dominaban en los EE.UU., en lo que ahora es Canadá occidental abundaban las coníferas y otras gimnospermas.



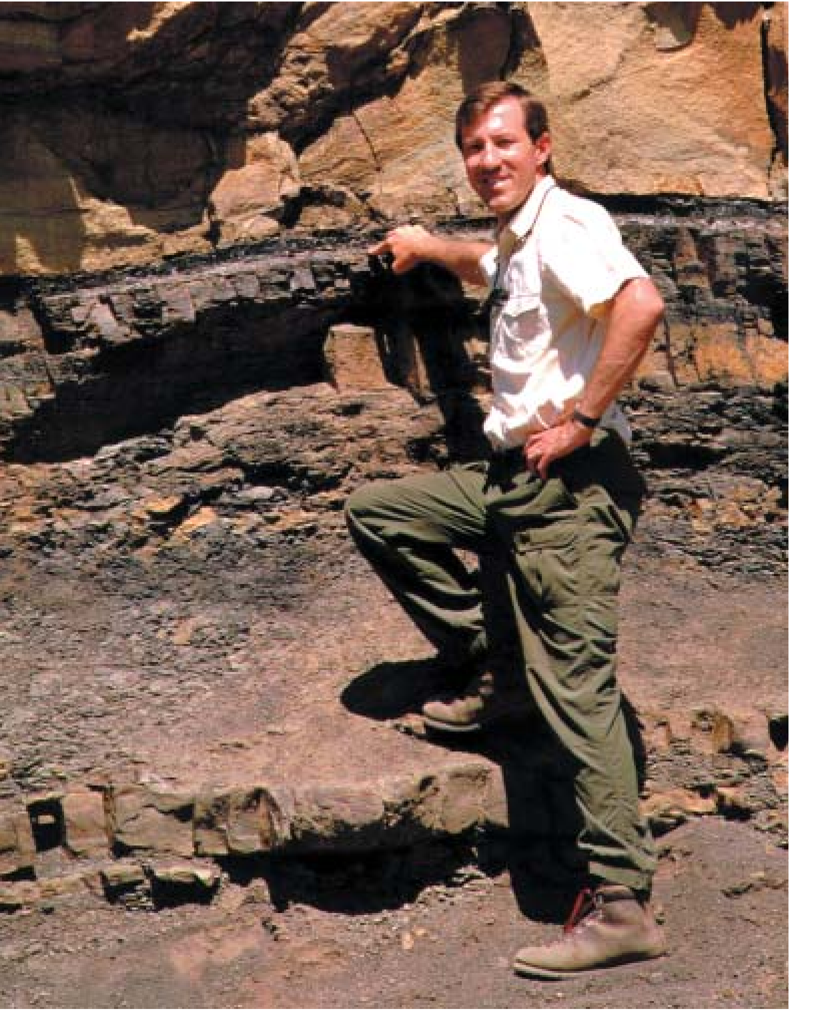
1. EL BOSQUE DEL CRETACICO era cálido y húmedo. Albergaba árboles planifolios, palmeras, plantas tropicales de hojas grandes, herbáceas y helechos.

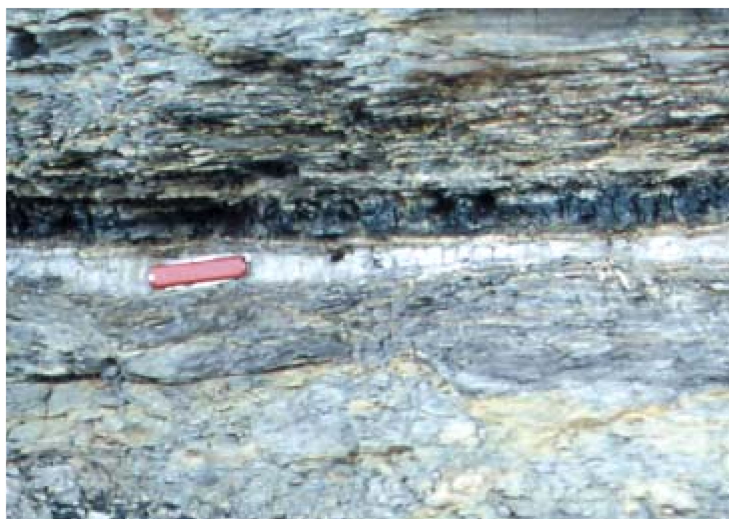


2. EL BOSQUE TERCIARIO inicialmente contenía menos biodiversidad. La cubierta original de helechos y herbáceas dejó paso a parientes de los sicomoros, nogales y palmeras modernos.

Además de asolar los bosques, los incendios produjeron una importante contaminación atmosférica. El hollín y el polvo generados por el impacto cubrieron el cielo, que se tornó impermeable a la luz solar. Algunos cálculos sugieren que la superficie del planeta se obscureció como una cueva sin luz. Las plantas fotosintetizadoras se agostaron y las cadenas alimentarias se desplomaron, incluso en zonas no afectadas por los incendios forestales, como el mar. Se ha comparado esta fase con el "invierno nuclear", un período frío que podría seguir a una guerra nuclear [*véase* "Efectos climáticos de una guerra nuclear", de Richard P. Turco, Owen T. Toon, Thomas P. Ackerman, James B. Pollach y Carl Sagan; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre 1984]. La suciedad tardó meses en desaparecer. Probablemente cayó como una lluvia azul, similar a la lluvia de esa tonalidad, rica en cenizas, que se produce después de una erupción volcánica.

A partir de los incendios forestales modernos, hemos estimado que la conflagración liberó 10 billones de toneladas de dióxido de carbono, 100.000 millones de toneladas de monóxido de carbono y 100.000 millones de toneladas de metano. En total, una cantidad de carbono equivalente a 3000 años de consumo de combustibles fósiles al ritmo actual. Por ello, a las condiciones de oscuridad e invernales siguió un intervalo de caldeamiento por efecto invernadero. Los incendios produjeron pirotoxinas, cloro y bromo, gases extenuantes.





2. EL GRAN CEMENTERIO levantado por el cataclismo de Chicxulub se ha conservado en una capa de arcilla de color claro y grosor parecido al de una navaja del ejército suizo (*arriba*). Uno de los autores (Kring) señala dicha capa en un afloramiento rocoso de la cuenca Ratón, en los Estados Unidos sudoccidentales (*izquierda*). Al acercarnos al hori-

DANIEL D. DURDA (*izquierda*); DAVID A. KRING (*centro y derecha*); WENDY S. WOLBACH UNIVERSIDAD DE PAUL (*inserto*)

Los dos últimos contribuyeron a la destrucción de la capa de ozono. Todos estos efectos agravaron de forma espectacular las demás consecuencias ambientales del impacto, como la lluvia de ácido nítrico y de ácido sulfúrico y la vaporización del dióxido de carbono almacenado en las rocas del lugar de impacto.

El día siguiente

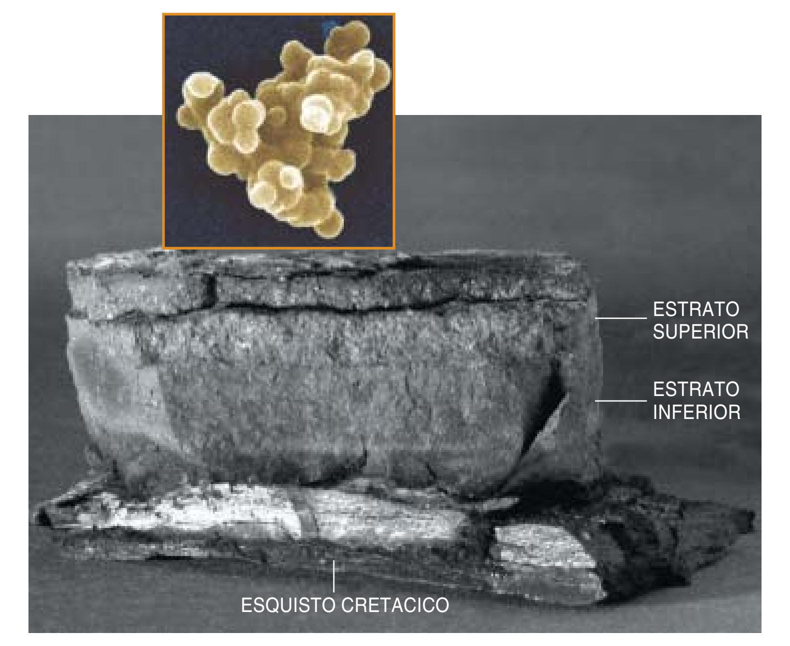
El registro fósil contiene un patrón de perturbación ecológica que encaja con el supuesto origen de la oleada de incendios forestales. Los sedimentos depositados inmediatamente después del impacto entrañan una signatura biológica, advertida por Robert H. Tschudy y sus compañeros, del Servicio de Inspección Geológica de los Estados Unidos, que se asocia a los incendios: una concentración, anómala por su desmesura, de esporas de helechos. Siguiendo el mismo comportamiento pionero que muestran en los bosques quemados actuales, los helechos (*Cyathidites*) fueron las primeras especies vegetales que repoblaron el paisaje denudado por el cataclismo. A veces, los helechos aparecían junto a *Ulmoideipites*, plantas con flores polinizadas por el viento. En ciertos ecosistemas sin pteridófitos, cumplían tal misión colonizadora los mantos algales.

En sedimentos depositados en los actuales Colorado y Montana, Iain Gilmour y su equipo, de la Universidad a Distancia de Inglaterra, hallaron huellas químicas e isotópicas de bacterias oxidantes del metano. Esto indica que la pérdida de tanta vida pudo haber creado temporalmente condiciones anóxicas en microecosistemas de aguas continentales. Aunque el éxito de tales bacterias no constituye en sí mismo una señal del incendio, sí refleja el carácter ominoso y súbito de la mortandad, que sólo admite explicación si la desencadenó una conflagración global.

Cabría preguntarse cómo pudo sobrevivir un organismo en semejante infierno. Hubo un elemento decisivo: la distribución desigual del fuego. Las simulaciones muestran, y la paleobotánica lo corrobora, que las regiones más septentrionales de Norteamérica y Europa se libraron de la devastación considerada en su grado máximo. En los actuales Territorios del Noroeste, Arthur Sweet, del Servicio de Inspección Geológica del Canadá, descubrió que la concentración de polen de gimnospermas (coníferas y otras plantas con ellas emparentadas) se reducía de manera espectacular, si bien no llegaba a desaparecer. Parte, pues, de la bóveda arbórea de los bosques sobrevivió a los incendios forestales, incluso en aquellos casos en los que los fuegos quemaron un sotobosque de angiospermas (plantas con flores). En estas y otras regiones relativamente intactas, el calor fue menos intenso. Las ciénagas o los bordes de las mismas proporcionaron cierta protección a plantas y animales.

Fundado en estudios de plantas, esporas y polen fósiles, el grupo encabezado por Kirk R. Johnson, del Museo de la Naturaleza y la Ciencia de Denver, calculó que el 51 por ciento de las especies de angiospermas, el 36 por ciento de las gimnospermas y el 25 por ciento de los pteridófitos se extinguieron en Norteamérica. El polen y las hojas fósiles sugieren que los árboles caducifolios sobrevivieron mejor que los perennifolios, quizá porque permanecían latentes.

Los árboles de polinización eólica también se desenvolvieron mejor. Por una razón sólida: pudieron medrar pese al exterminio de insectos y otros animales



zonte de arcilla observamos dos subcapas (*derecha*). La inferior aparece sólo en localidades próximas al impacto; está constituida por roca fundida expulsada por el cráter. La subcapa superior contiene escombros que salieron eyectados hacia el espacio y cayeron de nuevo al suelo, así como hollín generado por los incendios (*detalle*).

polinizadores. Conrad C. Labandeira y sus colaboradores, de la Institución Smithsoniana, sostienen que muchos insectos desaparecieron o se extinguieron; fundan su hipótesis en un dato del registro fósil de Dakota del Norte, que se libró de los efectos más devastadores: la escasez de hojas dañadas por insectos.

Sweet ha mostrado que un primer ecosistema "de supervivencia", dominado por las especies más robustas, pronto dejó paso a un ecosistema "oportunista", compuesto por un tipo distinto de helecho (*Laevigatosporites*) y varios tipos de plantas con flores que podían beneficiarse de la tabla rasa ecológica. Tomadas en su conjunto, estas plantas tejieron un tapiz herbáceo. En la fase final de ese proceso de recuperación, retornó la bóveda arbórea. Si tomáramos por referencia la evolución de un bosque moderno, la repoblación tardaría al menos 100 años. Pero Sweet y Upchurch coinciden en que el proceso real avanzó con mayor parsimonia; a juzgar por la proporción de plantas fósiles halladas en los sedimentos posteriores al impacto, se prolongaría unos 10.000 años.

Disponemos de otro parámetro para computar el tiempo de recuperación: la respuesta del ciclo global del carbono. La pérdida de bosques, que contienen más del 80 por ciento del carbono situado sobre el suelo (al menos en la actualidad), junto con la emisión de dióxido de carbono generado en los incendios y la caliza vaporizada en el lugar del impacto elevaron drástica y repentinamente la concentración atmosférica de carbono. En un análisis isotópico de los sedimentos depositados tras el impacto, Nan C. Arens, de la Universidad de California en Berkeley, y A. Hope Jahren, de la Universidad Johns Hopkins, llegaron a la conclusión de que, en las regiones continentales, el ciclo del carbono pudo tardar 130.000 años en recuperar el equilibrio. En los ambientes marinos, Steven L. D'Hondt, de la Universidad de Rhode Island, y otros investigadores sugieren que se necesitaron tres millones de años para que el flujo de materia orgánica hasta las profundidades oceánicas volviera a sus valores normales.

Primavera silenciosa

Tras el episodio de Chicxulub, el planeta presentaba un aspecto, olores e incluso sonidos diferentes. Si pudiéramos transportarnos al Cretácico, oiríamos dinosaurios moviéndose entre la maleza, sus gritos (de reclamo, de alerta) y el zumbido de ciertos insectos. Los mamíferos, en cambio, pasarían casi inadvertidos, moviéndose con un susurro entre las hojas, como los topillos de nuestros días. Pero en los meses subsiguientes al impacto, el sonido animal desapareció del planeta. El viento, los cursos de agua y la lluvia dominaban el paisaje sonoro. Poco a poco, los insectos primero, los mamíferos después, volvieron a oírse. Hubieron de transcurrir cientos de años, si no cientos de miles de años, para que los ecosistemas construyeran arquitecturas nuevas y robustas.

La tormenta de fuego originada por el impacto de Chicxulub y la subsiguiente contaminación resultaron devastadoras. Pero, probablemente, lo más mortífero fue la combinación de tantos efectos ambientales. Asolaron ecosistema tras ecosistema, aunque de forma diferente y a escalas de tiempo distintas: días en el caso de los cascotes incendiarios, meses en el caso del polvo estratosférico y años para los aerosoles de ácido sulfúrico.

La vida encontró en su diversidad la tabla de salvación. Aunque se perdieron multitud de especies e incontables individuos, algunos organismos sobrevivieron y proliferaron. El impacto abrió nichos ecológicos para la evolución de los mamíferos, lo que, andando el tiempo, condujo al desarrollo de nuestra propia especie. En este sentido, el cráter de Chicxulub constituye el crisol de la evolución humana.

Bibliografía complementaria

MAJOR WILDFIRES AT THE CRETACEOUS/TERTIARY BOUNDARY. Wendy S. Wolbach, Iain Gilmour y Edward Anders en *Global Catastrophes in Earth History*. Dirigido por Virgil L. Sharpton y Peter D. Ward. Geological Society of America, número especial 247, págs. 391-400; julio 1990.

EXTINCTION: BAD GENES OR BAD LUCK? David M. Raup. W. W. Norton. 1991.

T. REX AND THE CRATER OF DOOM. Walter Alvarez. Princeton University Press, 1997.

NIGHT COMES TO THE CRETACEOUS. James Lawrence Powell. Harvest Books. 1999.

TRAJECTORIES AND DISTRIBUTION OF MATERIAL EJECTED FROM THE CHICXULUB IMPACT CRATER: IMPLICATIONS FOR POSTIMPACT WILDFIRES. David A. Kring y Daniel D. Durda en *Journal of Geophysical Research: Planets*, vol. 107, n.º E8, págs. 6-22; agosto 2002.

Importancia del suelo

en el cultivo de caña de azúcar

Los suelos cultivados con caña de azúcar superan las 611.124 hectáreas, siendo México uno de los principales productores mundiales. Con el objetivo de lograr una producción rentable y competitiva en el mercado agroindustrial, el suelo cañero se ha convertido en uno de los más laboreados y mecanizados.

El manejo intensivo del suelo altera sus propiedades de manera significativa. Actividades como la limpia y preparación del terreno, la siembra, las labores de cultivo y la aplicación de insumos, entre otras, han tenido un impacto negativo sobre el suelo. Entre los efectos más notorios observados en los cultivos de caña de azúcar destacan las elevadas tasas de absorción de nutrientes por parte de la planta, principalmente de los elementos primarios nitrógeno, fósforo y potasio. El potasio encabeza la lista de elementos más absorbidos. Le siguen el nitrógeno, el calcio, el magnesio y el fósforo.

El rendimiento promedio del suelo cañero en México oscila entre las 53 y las 150 toneladas por hectárea, en función de la fisiografía de la zona, la variedad de caña y el manejo del cultivo. Este bajo rendimiento se debe al empobrecimiento del suelo en condiciones de baja fertilización, el nulo aporte de los residuos de la cosecha y la quema de la caña de azúcar, que se realiza para facilitar el corte. En promedio, el 40 % de los residuos agrícolas que se producen cada año en los diferentes países en vías de desarrollo se queman en el mismo campo. De éstos, el 11 % se genera en el cultivo de caña de azúcar. La quema constituye uno de los factores que más afectan a los contenidos de materia orgánica del suelo, pues se separan los tallos, las puntas y la paja, que se eliminan para limpiar el terreno. Estas actividades constituyen la principal vía de salida de los nutrientes del suelo.

Existe una gran diversidad de suelos de cultivo de caña de azúcar. En las regiones cañeras de México abundan el fluvisol, el vertisol, el cambisol, el luvisol y el leptosol. Son suelos generalmente profundos y de fertilidad regular, aunque pueden presentar una gran variabilidad en otras características. La combinación de todas ellas determina el rendimiento del cultivo. El fluvisol, un suelo de textura media, se origina a partir de aluviones antiguos y presenta un color pardo. El vertisol se origina también a partir de aluviones; presenta textura fina, color pardo, agrietamiento pronunciado en épocas secas y una permeabilidad moderadamente lenta. El cambisol procede de rocas calizas y areniscas, posee colores amarillentos o anaranjados

Demanda y suministro de nutrientes (en kg por hectárea) para el cultivo de la caña de azúcar en un ingenio de Tenosique, Tabasco

Unidad de suelo	Demanda			Suministro		
	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O
Fluvisol	135	90	192	55	87	420
Vertisol	97	100	321	54	88	303
Cambisol	97	65	249	54	61	283
Luvisol	171	116	444	57	91	355
Leptosol	128	120	274	56	102	262

Dosis de fertilización recomendadas según el rendimiento del cultivo en un ingenio de Tenosique, Tabasco. Todas las magnitudes se expresan en kg por hectárea

Unidad de suelo	Rendimiento	N	P_2O_5	K_2O
Fluvisol	120	160	60	60
Vertisol	100	120	80	80
Cambisol	80	120	60	60
Luvisol	90	140	80	80
Leptosol	120	160	80	80



Rebrote de plántulas de caña de azúcar en el segundo ciclo de cultivo "soca" en Tabasco

y textura media. Colores amarillentos y grisáceos y textura fina caracterizan al luvisol. El leptosol, desarrollado a partir de rocas calizas del terciario, muestra colores oscuros y textura media.

Se ha acometido la investigación de la extracción de nutrientes de la caña de azúcar. Se busca, en concreto, un indicador del agotamiento del suelo a partir de la cantidad de nitrógeno u otro elemento extraído por tonelada de tallos molederos. En México se extraen en promedio 1,3 kg de nitrógeno, 0,36 kg de fósforo y 2,3 kg de potasio por tonelada de caña. Dado que se trata de un sistema dinámico, el suelo cañero se enfrenta a un abastecimiento irregular de nutrientes. En tales circunstancias, la fertilización constituye un buen aporte externo que ayuda a incrementar el rendimiento del cultivo.

En las últimas décadas se ha intensificado el desarrollo de métodos para gestionar la fertilización. Debido al incremento de los precios y a la voluntad de conservar el medio, cada vez resulta más necesario un uso eficiente y racional de los fertilizantes. Las dosis recomendadas de fertilización se deducen del balance entre la demanda y el suministro de nutrientes. Si la demanda resulta mayor que el suministro, se crea un déficit de nutrientes, que se puede suplir mediante la fertilización, dependiendo siempre del tipo de suelo. Cuando la demanda cae por debajo de la aportación, se recomienda mantener la fertilidad del suelo y los rendimientos del cultivo, mediante dosis de fertilización que igualen a la extracción.

Existe otra forma de evitar la degradación de estos suelos cultivados. Nos referimos al manejo viable. A largo plazo, éste debe garantizar una producción acorde con los recursos del medio y contribuir a la mejora de la calidad de vida de los productores. La estabilidad económica que proporciona el cultivo se puede invertir en maquinaria agrícola para realizar la cosecha en verde; ello aumenta los beneficios económicos y ambientales.

Varias prácticas agrícolas benefician los suelos cañeros: asegurar los contenidos de materia orgánica (un 3 % permite mantener la fertilidad, retener la humedad y conservar la estructura), evitar la quema de residuos de cosecha, promover las rotaciones con otros cultivos y utilizar los residuos agroindustriales para mejorar las propiedades del suelo. Por último, resulta básico concienciar a todos los que participan en esta actividad. Sólo si se toman las medidas adecuadas se evitará la pérdida de la productividad de los suelos dedicados a la caña de azúcar.

DAVID JESÚS PALMA LÓPEZ
LILIANA ARMIDA ALCUDIA
SERGIO SALGADO GARCÍA
Colegio de Posgraduados, Campus Tabasco
México

Origen de los perros del Nuevo Mundo

Proceden de los euroasiáticos

Hace 6000 años, antes de la aparición de los grandes imperios y de los viajes transoceánicos, existían ya dos mamíferos cuya distribución abarcaba Europa, Asia, Africa, Oceanía y América: el hombre y el perro. El perro constituye un elemento fundamental en la mayoría de las culturas humanas. Convive tanto con los aborígenes australianos, como con los esquimales de Alaska o con nosotros mismos. Mucho antes de que ninguna otra especie animal o vegetal fuese domesticada, perro y hombre ya coexistían.

El perro deriva de lobos domesticados en algún lugar de Eurasia —quizás en varios lugares—. La arqueología revela que, como resultado de la selección ejercida por el hombre, los perros ya se encontraban morfológicamente diferenciados de los lobos hace 15.000 años. Hasta la fecha, los fósiles más antiguos de cánidos identificados como perros proceden de Europa central y del cercano Oriente.

Los restos más antiguos de perros encontrados en el Nuevo Mundo proceden del estado norteamericano de Utah, y datan de hace unos 10.000 años. Tanto la gran distancia que separa estos restos de los encontrados en Europa y Asia, como su antigüedad, unidas al hecho de que la comunicación entre Asia y Norteamérica se cortase hace unos 12.000-13.000 años (debido al ascenso del nivel del océano Pacífico tras la última glaciación), han llevado a muchos investigadores a pensar que los perros americanos derivan de una domesticación independiente del lobo en ese continente. Esta hipótesis se puede estudiar mediante el análisis genético de perros de origen americano y su comparación con los perros europeos y asiáticos. Sin embargo, tal análisis no resulta simple, ya que es muy probable que los perros americanos y los del resto del mundo se hayan entrecruzado frecuentemente durante los últimos 500 años. Para precisar el origen de los perros americanos es necesario estudiar cómo eran antes de la llegada de los europeos (con sus perros) durante los últimos siglos.

Hemos analizado secuencias del ADN mitocondrial aisladas a partir de restos óseos de perros precolombinos de América Latina y de perros de Alaska que datan de antes de la llegada de los primeros exploradores en 1741. Los análisis genéticos sugieren que los perros nativos americanos tenían el mismo origen que los eurasiáticos y, probablemente, derivaban de perros que llegaron con los primeros pobladores del continente americano, hace al menos 13.000 años, procedentes de Asia. La gran diversidad de linajes observada entre los perros nativos americanos indica que debieron de llegar acompañando a los hombres en varias oleadas y no en una sola invasión. Al arribar al Nuevo Mundo esos cánidos quedaron aislados de sus ancestros y evolucionaron dando lugar a unos linajes únicos, ligeramente diferenciados.



El lobo es el ancestro del perro. Sin embargo los perros americanos no derivan de lobos americanos

El hecho de que los perros nativos americanos tengan el mismo origen que los eurasiáticos abre unas perspectivas fascinantes. Hace 13.000-15.000 años, al final del Paleolítico superior, perros con un origen común se encontraban desde Europa central hasta Norteamérica. Las poblaciones humanas eran todavía nómadas y carecían de animales o plantas domésticos que les permitiesen un cierto control del medio: eran autosuficientes, en el sentido de que su supervivencia no solía depender del comercio con sus vecinos. Sin embargo, nuestros resultados indican que un elemento cultural, el perro, ya se compartía a lo largo y ancho de tres continentes, abarcando distancias de más de 9000 kilómetros. Esto implica, por un lado, que el intercambio y la relación entre esas sociedades pueden haber sido mucho más extensos de lo que habitualmente pensamos. Por otro indica que ya existía un gran interés por poseer perros.

Hoy por hoy desconocemos las razones por las que los perros fueron domesticados. Hay quienes piensan que se vería en ellos fuente de alimento, pero resulta difícil imaginar que la primera especie en ser domesticada fuese un carnívoro de mediano tamaño en lugar de un herbívoro mayor. Se han sugerido otras posibles razones: compañía, protección, animal de carga, ayuda para la caza, consecuencia de una relación comensal... No sabemos las razones que llevaron a la íntima asociación entre hombres y perros. Sin embargo, los resultados de los estudios genéticos sugieren que, fuese cual fuese la causa, esta asociación representaba un beneficio tal, que muchas sociedades paleolíticas en todo el mundo se interesaron en poseer perros. Resulta imprescindible un mayor conocimiento sobre la relación entre hombre y perro en sociedades primitivas para poder comprender el modo de vida al final del Paleolítico.

En la actualidad ese mismo fragmento de ADN mitocondrial ha sido estudiado en cientos de perros de todo el mundo, incluyendo razas de origen americano. Ahora bien, no se han encontrado los linajes que existían en los perros nativos del Nuevo Mundo. Aparentemente, estos linajes quedaron excluidos del origen de las razas actuales más comunes. El impacto que la llegada de los europeos a América tuvo sobre muchos grupos nativos y sus culturas comportó que incluso sus perros fuesen de un modo u otro discriminados respecto a los de los invasores. Quizá los linajes de los perros nativos americanos han desaparecido, llevándose consigo parte de nuestra historia. Sin embargo, como las razas de perros modernas dependen más de los gustos de los criadores que de los procesos naturales, es posible que esos linajes hayan sido excluidos de las razas más reconocidas pero existan aún entre perros cimarrones, asilvestrados o de razas no reconocidas, perros ignorados por los criadores y por las sociedades canófilas. Quizá son precisamente ésos los auténticos herederos de los perros nativos del Nuevo Mundo.

CARLES VILA
Depto. de Biología Evolutiva,
Universidad de Uppsala

JENNIFER LEONARD
Dpto. Biología Sistemática, Museo Nacional de Historia Natural, Institución Smithsoniana, Washington

---

Cetonas

Reducción estereoselectiva

En las transformaciones químicas operadas por los organismos, la reducción de compuestos carbonílicos mediante alcohol deshidrogenasas constituye un proceso de interés primordial. La explicación técnica nos dice que se crea un nuevo centro estereogénico a partir de una estructura simétrica.

El proceso biotransformador puede hacerse mediante enzimas aisladas o en células enteras. Ambas aproximaciones ofrecen ventajas e inconvenientes. Las enzimas libres permiten un proceso simplificado de recuperación del producto de reacción, sin aparición de productos secundarios. Pero exige desarrollar el escalado de la síntesis de la enzima y su purificación. Además, al utilizar cofactores (NADH/H o NADPH/H), se requiere la adición de cantidades estequiométricas del cofactor —que es caro—, pues la regeneración *in*

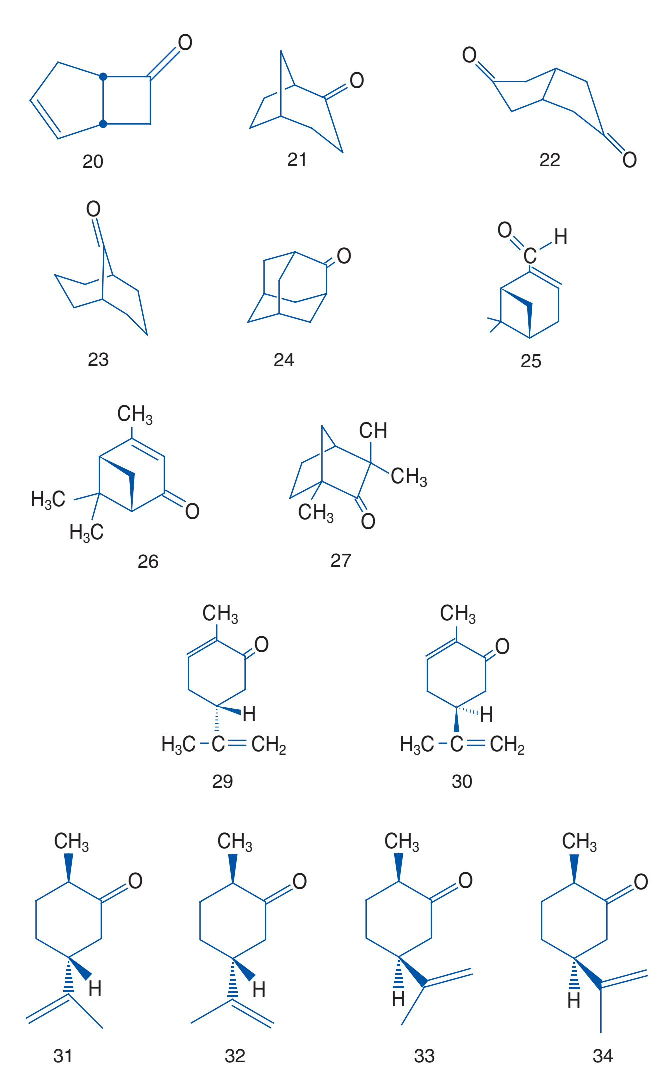
vitro del mismo no resulta económicamente rentable ni escalable.

Si se recurre a células enteras, el proceso de reducción de compuestos carbonílicos puede originar productos secundarios o provocar la desaparición de productos que se transforman en biomasa, debido a la presencia de muchas enzimas intracelulares. La recuperación del producto resulta entonces complicada. Pero ofrece la ventaja de que la coenzima se regenera *in situ* sólo con el suministro de glucosa, sacarosa, etcétera.

A partir de una colección taxonómica de 421 microorganismos, confeccionamos una biblioteca microbiana. La reacción test fue la reducción de ciclohexanona en ciclohexanol. Se trata de una reacción que puede seguirse por cromatografía de gases de forma automatizada. Con la misma se nos permite seleccionar, de manera rápida y segura, los microorganismos activos en la reacción de reducción.

De 231 microorganismos que resultaron positivos en el análisis, se seleccionaron 11. Cumplían dos criterios discriminantes: una actividad reductasa frente a ciclohexanona por encima del 50 % y una actividad oxidasa frente a ciclohexanol baja o nula (por debajo del 10 %).

Se aplicó luego un rastreo secundario ("screening"). En efecto, las cepas seleccionadas intervinieron en la reducción de diversas cetonas monocíclicas de tamaño diferente: ciclobutanona, ciclopentanona, cicloheptanona, ciclooctanona, y ciclododecanona. De este estudio se seleccionaron los tres microorganismos más activos: *Gongronella butleri*, *Diplogelasinospora grovesi* y *Schizosaccharomyces octosporus*. Procedimos luego a un rastreo terciario, que consistió en estudiar una serie de compuestos con funciones estereoquímica y regioquímica diferentes (*figura 1*).



1. Algunas cetonas de gran tamaño reducidas por los microorganismos seleccionados

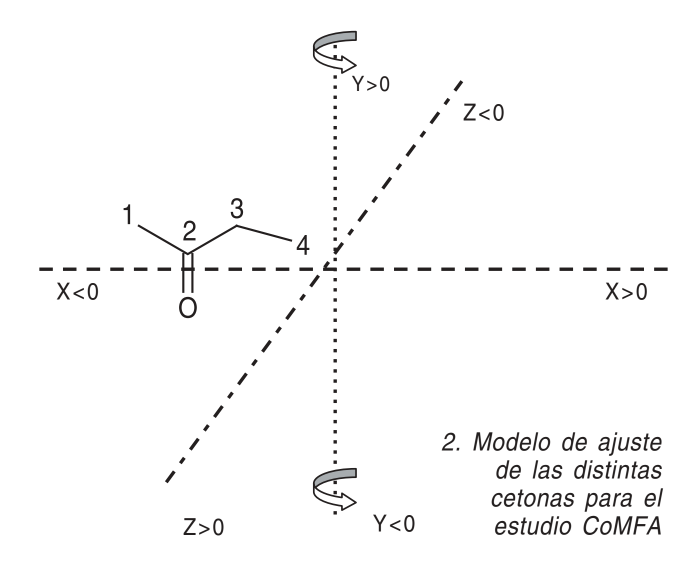
En toda búsqueda de nuevos microorganismos se intenta predecir qué requerimientos estéricos, electrónicos o ambos deben cumplir las cetonas para ser substratos de nuevas enzimas. El conocimiento global de la interacción entre enzima y substrato, así como de sus consecuencias, se puede alcanzar por dos caminos diferentes. En primer lugar, por el estudio del sitio activo de la enzima, vía que no pudimos seguir por tratarse de microorganismos desconocidos. En segundo lugar, el análisis de las propiedades moleculares del substrato y su actividad biológica mediante simulaciones teóricas. Nos servimos del método CoMFA para analizar la energía de interacción entre moléculas sonda y substratos, en los puntos del espacio que rodean a las moléculas de interés.

En el presente estudio seleccionamos, por molécula de referencia, la 2-adamantanona. Por regla de alineación de las moléculas que forman nuestra base de datos tomamos el solapamiento del carbono carbonílico y de los carbonos adyacentes. En el caso de que la estructura presente radicales substituyentes o conste de varios ciclos, se solaparía, sobre el carbono 4, el primer carbono situado en la parte de la molécula más voluminosa.

La optimización de la geometría de las moléculas utilizadas en la conformación que consideramos activa se llevó a cabo mediante cálculos de mecánica molecular. Las cargas eléctricas centradas en el átomo se calcularon, a partir del potencial electrostático molecular, mediante un procedimiento común para la simulación de proteínas, ácidos nucleicos y moléculas orgánicas. Se calcularon las energías de solvatación de los substratos con un modelo polarizado continuo.

Una vez realizado el CoMFA obtuvimos una estructura tridimensional donde aparecen representadas las distintas zonas de interés desde el punto de vista estérico y electrostático. Para la representación gráfica de distintas zonas tridimensionales nos servimos de un código de colores.

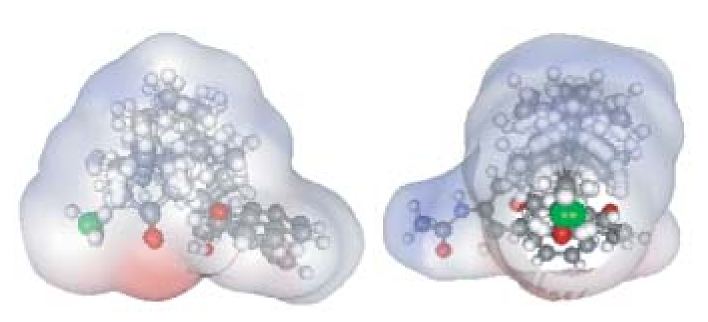
¿Qué se concluye de esta investigación? Existe una zona donde se privilegia la presencia de potencial negativo en el centro de la estructura y una amplia zona que reconoce potenciales electrostáticos positivos. Este modelo predictivo nos justificaría las buenas conversiones obtenidas (por encima del 70 %) con las 2-decalonas y la baja conversión (12 %) de la 1-tetralona. Nos confirma, además, que desde la 2-tetralona debería conducir a una conversión en alcohol muy elevada, teniendo en cuenta las características estéricas completadas con el gradiente de carga negativa pro-



2. Modelo de ajuste de las distintas cetonas para el estudio CoMFA

pio del anillo aromático, superpuesto sobre la zona electrostática. La presencia del anillo aromático (rico en electrones) de la 1-tetralona en una zona donde se encuentra favorecida la presencia de potencial positivo, determina que la actividad alcanzada en la reducción de este substrato sea menor (12 %) que para las 1-decalonas. Comprobamos también que se obtiene más de un 50 % de conversión en alcohol con *Diplogelasinospora grovesii*.

De la figura 3 deducimos que la *Diplogelasinospora grovesii* es un nuevo microorganismo capaz de reducir con buenos rendimientos todos los estereoisómeros de las 1 y 2 decalonas, así como los estereoisómeros 2R5R y 2SS de las dihidrocarbonas y todas las



3. Zonas estéricas y electrostáticas en el CoMFA de la D. grovesii

Rastreo de microorganismos que se mostraron activos en la reducción de ciclohexanona a ciclohexanol

Familia	Cepas estudiadas	Cepas activas
Hongos filamentosos	148	73
Levaduras	59	14
Basidiomicetos	60	9
Actinomicetos	43	42
Bacterias	71	45
Hongos marinos	33	21
Total	**421**	**204**

halocetonas precursoras de los β-bloqueantes adrenérgicos. El centro activo debe ser muy grande en comparación con el resto de los microorganismos estudiados. Por ello admite mucha mayor variedad de estructuras en su centro activo; dicho de otro modo, está menos restringido que en los otros casos. Si a ello sumamos su rapidez de crecimiento y los buenos resultados demostrados en las pruebas preliminares utilizando el liófilo del mismo como biocatalizador, cabrá suponer que se trata de un microorganismo muy prometedor en el desarrollo de este tipo de biotransformaciones y útil para la preparación de diversos fármacos con buen rendimiento y enantioselectividad.

J. D. Carballeira y J. V. Sinisterra
Depto. de Química Orgánica y Farmacéutica
Facultad de Farmacia de la Universidad Complutense, Madrid

E. Alvarez
Centro de Investigación Básica, Glaxo-SmithKline, Madrid

M. Campillo y L. Pardo
Laboratorio de Medicina Computacional
Unidad de Bioestadística
Universidad Autónoma de Barcelona

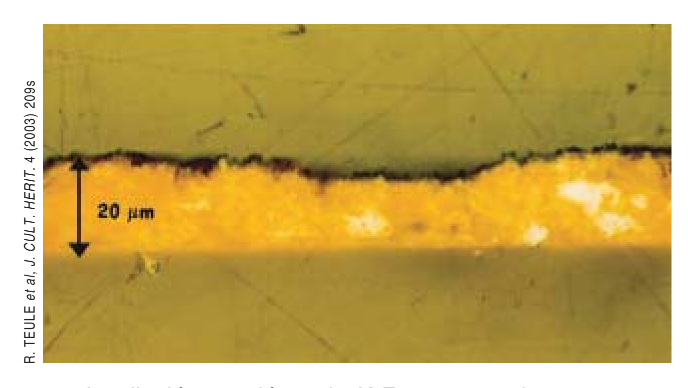
Limpieza con láser

Una herramienta en la conservación de pinturas artísticas

La idea de utilizar láseres como herramientas de limpieza y análisis superficial data de los años sesenta. Es tan antigua como el primer sistema láser, construido por Maiman en 1960. Ya en esa década se realizaron los primeros estudios de ablación por láser y se esbozaron muchas de las aplicaciones que hoy día conocemos. En el proceso de ablación, la interacción de un haz láser con un material sólido da lugar a la formación de un plasma en el que se eyectan desde la superficie átomos, moléculas o agregados. El plasma va acompañado de una emisión luminosa, cuyo análisis espectral permite determinar la composición elemental del material que constituye el blanco de ablación. Este es el principio de operación de la técnica denominada LIBS (*Laser Induced Breakdown Spectroscopy*, espectroscopia de ruptura inducida por láser).

El uso del láser en el tratamiento de superficies de alto valor histórico-artístico es una aplicación más reciente, pero el progreso en ese campo resulta imparable. La limpieza por láser de fachadas arquitectónicas y esculturas es un procedimiento ya incorporado a la práctica de la restauración. Existen hoy en día sistemas comerciales basados en láseres de Nd:YAG (neodimio dopado con itrio, aluminio y granate), emisores en la región del infrarrojo, que cumplen dicha

R. TEULE *et al*, J. CULT. HERIT. 4 (2003) 209s



1. Irradiación con láser de KrF, 248 nm, de una muestra de témpera de amarillo de Nápoles. Se observa una fina capa de material carbonizado

función. Numerosos monumentos europeos han sido recientemente restaurados con esta nueva técnica, entre ellos la catedral Notre Dame de París. Pero mientras la limpieza láser de superficies pétreas se halla muy desarrollada, su aplicación a la limpieza de superficies pictóricas (cuadros, policromías, etcétera) es más reciente. Los materiales pictóricos son muy sensibles a la radiación luminosa. Se requiere por tanto una investigación previa y sistemática de las condiciones de aplicación, que garantice la salvaguarda de sus propiedades.

Investigaciones previas han demostrado que los láseres de excímero, de emisión ultravioleta (UV), pueden ser utilizados para la eliminación de los barnices envejecidos y repintes que constituyen las capas más externas de las superficies pictóricas. Un láser de excímero consiste en un láser de impulsos que opera a una longitud de onda fija, dependiente de la mezcla de gases utilizada como medio de ganancia. En particular, el láser de criptón flúor (KrF), que opera a 248 nm, resulta el más adecuado para esta aplicación. La radiación UV del láser se absorbe de manera eficaz en la capa más externa de barniz. Esta capa puede eliminarse mediante ablación. La cantidad de luz transmitida a las capas interiores, donde se encuentran los materiales más sensibles a ella, como los pigmentos o el medio aglutinante (el material que se emplea para sustentar el pigmento y que puede ser huevo, en la témpera, o un aceite de origen vegetal, en la pintura al óleo), es mínima. Para la eliminación de las capas más externas de la superficie mediante el proceso de ablación, la energía de cada impulso láser por unidad de superficie, o fluencia, debe sobrepasar un cierto valor umbral. Dada esta condición, la ablación va acompañada de un plasma luminoso cuyo análisis espectroscópico, mediante la mencionada técnica LIBS, permite analizar la composición elemental del material eliminado y proporciona un diagnóstico "sobre la marcha" del proceso de limpieza que posibilita discriminar entre la capa de barniz y la capa pictórica. Esta herramienta de control confiere al procedimiento de limpieza láser una gran selectividad y fiabilidad.

En el marco de un reciente Proyecto Europeo con participación de institutos de investigación y restauradores, se han evaluado de manera sistemática las modificaciones físico-químicas inducidas por la radiación del láser de excímero de KrF en los materiales pictóricos de la pintura a la témpera, incluidos pigmentos, medios aglutinantes y barnices. Utilizando muestras modelo, diseñadas para simular una pintura real a la témpera y diversas técnicas analíticas y espectroscópicas se determinaron las modificaciones en la morfología de las superficies, cambios de color y químicos. Se observó que la irradiación láser directa de las capas pictóricas sin protección de barniz ocasiona procesos de decoloración que operan en mayor o menor grado dependiendo de la naturaleza y composición del pigmento. Este efecto tiene lugar en la capa más externa de la muestra, tal como se observa en la figura 1. El medio aglutinante se degrada asimismo en presencia de pigmentos inorgánicos. En algunos casos se observan alteraciones en la composición molecular de éstos. Cuando la capa pictórica se encuentra protegida por otra de barniz, no se detectan esos efectos de decoloración o degradación. Como resultado de estas investigaciones, ha sido posible diseñar una estrategia adecuada para la limpieza láser de las superficies pictóricas recubiertas de barniz. Si se eliminan mediante ablación controlada las capas más externas de barniz envejecido y se preserva una fina capa sobre el substrato pictórico, ésta actuará como protección, impidiendo el paso de la luz del láser a las capas más internas y protegiendo los materiales pictóricos del posible efecto negativo de la exposición directa a la radiación láser.

Los resultados de esta investigación demuestran la viabilidad del láser como instrumento para la restauración de pinturas artísticas. Para la eliminación de barnices y repintes, el grado de control del proceso de limpieza puede superar al que se obtiene con métodos tradicionales basados en medios químicos (disolventes) o mecánicos. El ensayo del procedimiento sobre superficies pictóricas reales ha resultado altamente satisfactorio, como se aprecia en el ejemplo de la figura 2.

R. TEULE *et al*, J. CULT. HERIT. 4 (2003) 209s



2. Limpieza láser parcial (KrF, 248 nm) de capas de suciedad sobre una pintura dañada en un incendio

MARTA CASTILLEJO
Instituto de Química Física Rocasolano, CSIC
Madrid

Texto: Alf Skovgaard y Enric Saiz
Fotos: Alf Skovgaard y Albert Calbet

Pequeños parásitos del mar

El término *parásito* proviene del griego παρασιτος, que indica la acción de comerse la comida de otro. En biología, se entiende por parásito el organismo, animal o vegetal, que vive en íntima relación con otra especie (el *huésped*), del cual obtiene su alimento. En esa relación unilateral sólo el parásito obtiene un beneficio. Por lo común se nutre de los tejidos vivos del huésped, pero en ciertos casos se aprovecha de su ingesta. Los parásitos no matan a su huésped de forma inmediata; lo depauperan en mayor o menor grado, aunque a largo plazo pueden redundar en la muerte del huésped.

El parasitismo constituye un fenómeno muy extendido. Conocemos su presencia en el hombre (lombrices intestinales), en plantas y en animales domésticos. Fuera del dominio de los expertos, muy pocos saben, sin embargo, que incluso los organismos más pequeños que habitan el planeta se hallan expuestos al parasitismo. Tal es el caso de los copépodos marinos, crustáceos integrantes del plancton animal (zooplancton).



1. Imagen del copépodo calanoide Nannocalanus minor *con el dinoflagelado endoparásito* Blastodinium contortum *en su interior. El parásito forma una masa celular dentro del tubo digestivo del copépodo, que puede apreciarse en la fotografía como un cuerpo amarillo*



2. Imagen del copépodo ciclopoide Oithona sp. *con el dinoflagelado endoparásito* Blastodinium oviforme *en su interior. Los dinoflagelados son un grupo muy característico de microalgas, con más de 2000 especies conocidas, de las cuales alrededor de 140 son parásitas de peces, crustáceos e incluso ciliados y otras algas*

El plancton marino se estructura en redes tróficas, muy complejas e imbricadas, en cuya base se encuentra el fitoplancton, formado por organismos fotosintéticos de muy pequeño tamaño que sintetizan materia orgánica. Parte de esta materia orgánica, a través de interacciones tróficas, se transfiere en última instancia hacia niveles tróficos superiores. Dentro de estas redes tróficas marinas, los copépodos desempeñan una función muy importante, pues al depredar sobre las algas microscópicas son el principal vehículo de transferencia de la producción primaria planctónica hacia organismos superiores, como los peces.

Los copépodos integran el grupo de metazoos más abundante del planeta. Como ocurre en todo animal, no sólo son explotados por sus depredadores, sino también por sus parásitos. Curiosamente, en este caso algunas de las microalgas unicelulares que constituyen su dieta parecen haber abandonado su tradicional modo de vida y se han especializado en alimentarse de sus propios depredadores. Ocurre así con ciertos dinoflagelados y otros grupos afines, que parasitan el interior del cuerpo de los copépodos (*endoparásitos*).

No se conoce bien el ciclo biológico de los endoparásitos de copépodos. Se cree que infectan al copépodo tras la ingestión de una zoospora. En lugar de ser digerida, esta zoospora crece y se divide; tras un posterior período de maduración, liberará al medio cientos o miles de nuevas zoosporas, que nadarán libremente hasta infectar a otro huésped. La presencia del parásito mermaría las tasas de crecimiento y reproducción del huésped y, en última instancia, podría acarrear su muerte.

Dada la ubicuidad del parasitismo en los copépodos, es de prever que desempeñen una función ecológica importante en el control de la demografía de estos crustáceos, amén de otros factores como la depredación y la disponibilidad de alimento.

3. Imagen de la zoospora del dinoflagelado parásito Blastodinium oviforme*, tras ser liberada*



4. Imagen al microscopio de epifluorescencia del dinoflagelado endoparásito Blastodinium mangini *en el interior del copépodo poecilostomatoide* Oncaea sp. *La mayoría de estos dinoflagelados parásitos conservan los cloroplastos, que aparecen en rojo en la fotografía debido a la autofluorescencia de la clorofila*



5. Imagen del copépodo calanoide Paracalanus parvus *infectado por el dinoflagelado parásito* Syndinium turbo*. Podemos identificar las zoosporas, puntos blanquecinos, que se liberan al exterior. A diferencia de* Blastodinium*, este parásito devora el interior del copépodo, a medida que se va multiplicando; sus zoosporas terminan por llenar el cuerpo del copépodo, provocando su muerte; se liberarán luego al medio*



6. Imagen del copépodo ciclopoide Oithona sp. *infectado por el parásito mixomiceto* Paradinium pouchetii*. Este parásito medra en el cuerpo del huésped. Antes de su liberación, las zoosporas salen por el ano y forman un esporangio, que aparece en la fotografía como un cuerpo ovoide unido al urosoma del copépodo*

La nueva Luna

Las recientes misiones a la Luna han revelado que todavía hay mucho por aprender del vecino más cercano a la Tierra

Paul D. Spudis

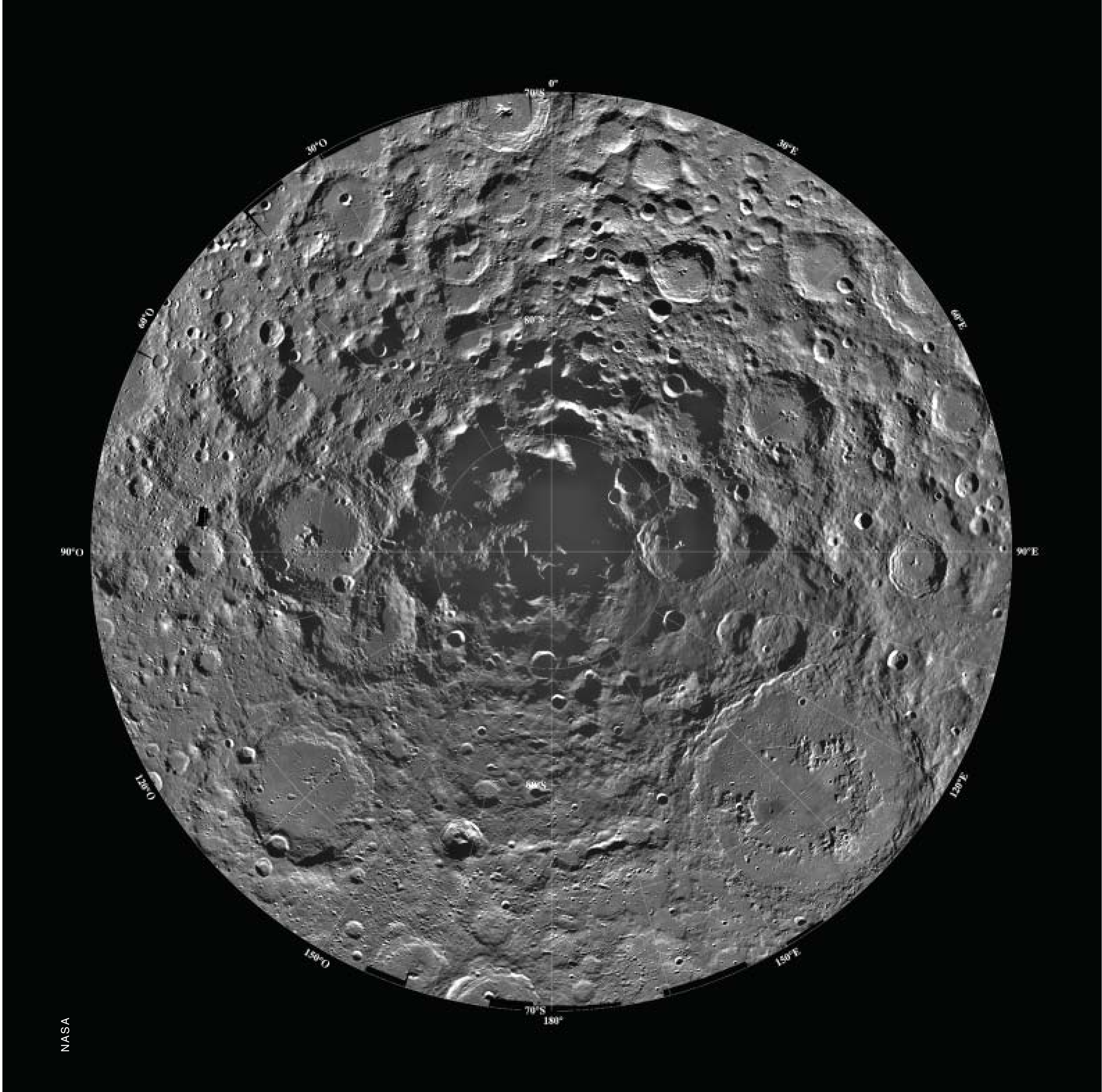
La Luna no revela sus secretos fácilmente. Aunque nuestro satélite fue el primer objeto planetario explorado con naves espaciales y el único visitado hasta ahora por astronautas, quedan todavía muchas preguntas pendientes acerca de su historia, composición y estructura interna. En la actualidad, se ha renovado el interés por la Luna; la Agencia Espacial Europea y Japón proyectan situar sondas en órbitas lunares; la NASA, por su parte, tiene pensado enviar una nave no tripulada a la cara oculta de la Luna. Estas misiones también arrojarán luz sobre la historia de los planetas interiores y rocosos del sistema solar: Mercurio, Venus, Marte y, en especial, la Tierra. La superficie de la Luna ha permanecido casi inalterada durante los últimos tres mil millones de años; podría guardar la clave de la formación y evolución de los planetas interiores.

Cuando se empezó a observar la Luna con telescopios, hace 400 años, se vieron dos tipos de terrenos en la superficie: las tierras altas, rugosas, brillantes, plagadas de cráteres, y las tierras bajas, con menos cráteres y más oscuras. Galileo Galilei llamó "maria" a las tierras bajas, que en latín significa mares, por su aspecto liso y oscuro. Una de las mayores sorpresas de la era espacial sobrevino en 1959, cuando la nave soviética Luna 3 fotografió la cara oculta, desconocida hasta entonces porque siempre permanece opuesta a la Tierra. Las fotografías mostraron que carece, casi por completo, de los oscuros mares tan notorios en la cara visible. Ciertas teorías ya formuladas quizás eluciden esta dicotomía de los terrenos, pero aún no se cuenta con una explicación segura.

El análisis de las rocas y la tierra traídas de la Luna por los astronautas del Apolo y por algunas naves no tripuladas ofreció una vislumbre de la evolución de la Luna. Se creó hará unos 4500 millones de años, cuando un cuerpo del tamaño de Marte chocó contra la Tierra primitiva. La colisión puso un chorro de roca vaporizada en órbita alrededor de la Tierra; los pequeños cuerpos que lo componían se acumularon tan deprisa, que el calor generado en el proceso licuó las capas exteriores de la Luna naciente. Se formó así un océano de roca líquida, o magma. La corteza lunar surgió más tarde; se formó con los minerales de baja densidad que emergieron hacia la superficie del océano de magma.

Siguió a esta fase temprana un virulento bombardeo de cometas, asteroides y meteoros. Algunos de los mayores bólidos crearon enormes depresiones de más

EL POLO SUR DE LA LUNA. Este mosaico se compone de 1500 imágenes tomadas en 1994 por la cámara de luz ultravioleta y visible de la nave Clementine. El polo está justo en el centro del mosaico; el borde del mosaico representa la latitud lunar de 70 grados sur. Tanto Clementine como el Lunar Prospector hallaron pruebas de la existencia de agua helada en las regiones en sombra permanente cercanas a los polos.



NASA

de 2000 kilómetros de diámetro. La mayoría de los cráteres y las depresiones, al menos en la cara visible, se rellenaron durante los siguientes 300 o 400 millones de años con lava basáltica rica en hierro; nacieron así los oscuros mares que observamos hoy día. A medida que pasaba el tiempo, el bombardeo fue remitiendo; los impactos se hicieron menos frecuentes y violentos. Esto explica por qué los mares, más jóvenes que las tierras altas, tienen menos, y menores, cráteres. Apenas nada más le ha ocurrido a la Luna en los últimos tres mil millones de años; después de que los fuegos volcánicos se apagaran, la única actividad registrada han sido los impactos esporádicos, la lluvia constante de micrometeoritos y seis visitas fugaces de una docena de astronautas hace más de 30 años.

Puesto que la Luna ha sufrido bombardeos y una actividad volcánica y tectónica, sirve de referencia para el conocimiento de esos procesos. En concreto, su ligazón a la Tierra hace de ella un lugar ideal para el estudio de los acontecimientos extraplanetarios ocurridos en esta parte del sistema solar en etapas tempranas de la historia. Casi todas las huellas de los asteroides y cometas que golpearon la Tierra hace miles de millones de años han sido borradas por la actividad geológica de nuestro planeta. En cambio, se conservan en la Luna.

Se aprendió mucho con las exploraciones de las misiones Apolo, si bien siguen sin resolverse un gran número de incógnitas. Se necesita cartografiar la Luna globalmente por medio de sensores remotos. Los dos sobrevuelos que, de camino a Júpiter, realizó la nave Galileo alrededor del sistema Tierra-Luna a principios del decenio de 1990 presagian los descubrimientos fascinantes que nos esperarían con investigaciones así. Descubrieron rocas de alto contenido en hierro en el suelo de la depresión Aitken del Polo Sur, en la cara oculta. Exploraron también mares por medio de filtros espectrales que facilitaron información de la composición superficial; los resultados probaron que la detección remota puede establecer la sucesión de flujos de lava en los mares.

Los mares lunares y las tierras altas

En 1994, el Departamento de Defensa de los EE.UU. lanzó la sonda espacial Clementine. Debía probar, mientras rodeaba la Luna en órbita polar, unos sensores ultraligeros concebidos para la defensa contra misiles. Clementine orbitó alrededor de la Luna durante 71 días. Levantó un mapa completo de la superficie en 11 longitudes de onda diferentes, tanto del visible como del infrarrojo cercano. Llevaba un medidor láser de distancias gracias al cual se dibujó, por primera vez, un mapa topográfico de la Luna entera. El seguimiento por radio de la órbita de la nave mejoró nuestro conocimiento del campo gravitatorio lunar. Y mediante un experimento improvisado con un radar se obtuvieron pruebas de la existencia de agua helada en las regiones del Polo Sur siempre sombreadas.

Tras Clementine, la NASA situó en 1998 el Lunar Prospector en una órbita polar alrededor de la Luna. Se trató de una las misiones que la NASA incluye bajo la rúbrica "Discovery"; como tal, cartografió la composición de la superficie lunar mediante la espectroscopía de rayos gamma y de neutrones. Confirmó la existencia de hielo en el Polo Sur y descubrió nuevos depósitos en el Polo Norte. Un espectrómetro de partículas alfa midió las emisiones de gas del interior lunar y un magnetómetro trazó la distribución de las anomalías magnéticas de la superficie. De nuevo, el seguimiento por radio de la nave mejoró nuestro conocimiento del campo gravitatorio. Finalmente, desde la Tierra, los controladores estrellaron el Lunar Prospector contra la Luna; querían que así saltara un penacho de vapor de agua superficial. Los telescopios de la Tierra y del espacio apuntaron hacia la zona del impacto, pero no observaron nada.

Al englobar los descubrimientos de los Apolo en una visión de conjunto, las mediciones de Clementine y Lunar Prospector han suscitado un replanteamiento de lo que se sabe de la Luna y su historia. Por ejemplo, en el *Oceanus Procellarum*, una gran depresión al oeste de la cara visible, los astronautas del Apolo 12 y del Apolo 14 hallaron rocas basálticas anómalas ricas en elementos presentes en cantidades de traza, o "KREEP" (la "K" por el potasio, "REE" por elementos raros terrestres dicho en inglés, y la "P" por el fósforo). Según los geólogos, esas trazas de elementos son incompatibles: no encajan bien en las estructuras cristalinas de los minerales que forman las rocas comunes. La existencia de rocas ricas en KREEP indica que la Luna joven sufrió intensos procesos de licuefacción y diferenciación, durante los cuales los elementos incompatibles se concentraron en la parte fundida de un sistema cada vez más sólido y cristalizado. El Lunar Prospector descubrió que las mayores concentraciones de KREEP se dan en el *Oceanus Procellarum*, aunque se desconoce el motivo de esta atípica distribución.

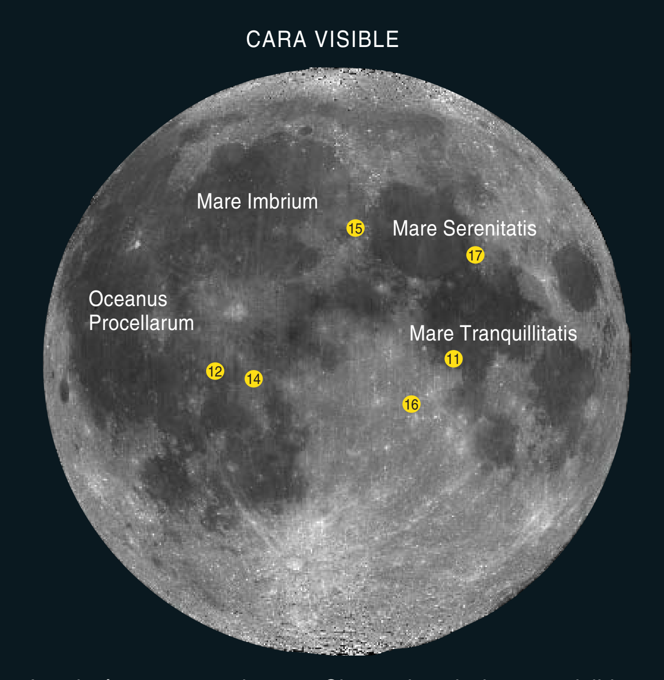
Es más, los satélites lunares confirmaron que en las tierras altas predomina la anortosita, una roca ígnea compuesta sobre todo de feldespato y rica en calcio y aluminio. Estas rocas se crearon en una fase temprana de la historia de la

Resumen/*Los misterios de la Luna*

- En el decenio de 1990, las naves Clementine y Lunar Prospector generaron mapas globales de la topografía, composición superficial, variaciones gravitatorias y anomalías magnéticas de la Luna.
- Los descubrimientos dieron un contexto a los hallazgos de las misiones Apolo, pero también suscitaron nuevas preguntas. En especial, se quiere conocer mejor el violento bombardeo al que se vio sometida la Luna hace unos cuatro mil millones de años.
- La Agencia Espacial Europea, Japón y EE.UU. tienen proyectado enviar sondas no tripuladas a la Luna para aclarar algunos de sus enigmas.

Luz y oscuridad

CARA VISIBLE



CARA OCULTA

Depresión Aitken del Polo Sur

Las imágenes tomadas por Clementine de la cara visible de la Luna nos muestran los dos tipos principales de terreno: las tierras altas, brillantes y repletas de cráteres, y las tierras bajas, oscuras y más llanas: los ”mares”. Por el contrario, la cara oculta de la Luna carece casi por completo de mares. Seis misiones Apolo visitaron la cara visible (los lugares del alunizaje se indican con círculos de color amarillo, numerados conforme a la misión de que se tratase). La NASA quiere ahora enviar una sonda robótica a la cara oculta.

INSTITUTO LUNAR Y PLANETARIO

Luna, cuando sus capas exteriores estaban completamente fundidas; la anortosita, poco densa, flotó hacia la superficie del océano de magma. Aunque ya se había supuesto la existencia de una fase así en la historia lunar basándose en las muestras traídas por los Apolo, la prueba definitiva vino con los datos de Clementine y Lunar Prospector, que establecieron la distribución global y la gran cantidad de anortosita. Puesto que la única fuente de calor que pudo haber licuado la Luna entera fue una acumulación muy rápida de cuerpos pequeños, la presencia de grandes cantidades de anortosita en la corteza apoya la teoría de que la Luna surgió de los restos de una colisión planetaria.

Los satélites lunares también han elucidado uno de los descubrimientos más intrigantes de las misiones Apolo: el ingente contenido de titanio en los basaltos de mar lunar recogidos por los astronautas del Apolo 11 en el primer alunizaje. Los geólogos lunares encontraban grandes dificultades a la hora de explicar cómo los magmas de alta densidad y elevado contenido de titanio pudieron ascender por encima de la corteza de anortosita, menos densa. Tanto Clementine como el Lunar Prospector demostraron que las lavas con grandes cantidades de titanio encontradas por el Apolo 11 son, en realidad, raras en la Luna. Aunque los basaltos de los mares presentan diversas concentraciones de titanio, sólo una pequeña fracción contiene las cantidades extremas observadas en el Mar de la Tranquilidad, el lugar del primer alunizaje. Los investigadores lunares han aprendido la lección: las muestras tomadas en una región determinada no tienen por qué representar a áreas mayores.

Las coladas de lava ofrecen una composición semejante, que puede reconocerse con claridad: cabe, pues, aplicar los datos de Clementine y Lunar Prospector a la hora de cartografiar las ocurridas en los mares. La edad de cada colada se determina midiendo la densidad de cráteres de impacto. Los mares más primitivos han estado expuestos a un intenso bombardeo durante más tiempo que los mares jóvenes, por cuya razón muestran una mayor densidad de cráteres. Se calculó la edad de los mares en los sitios donde alunizaron los Apolo mediante el análisis de los radioisótopos de las rocas; la de otros mares se ha estimado comparando las densidades de cráteres en ellos con las densidades en los lugares donde se alunizó. Los resultados revelan que, aunque la Luna tiene en sus mares lavas de composiciones y edades muy diversas, casi todas manaron hace entre 3000 y 3800 millones de años.

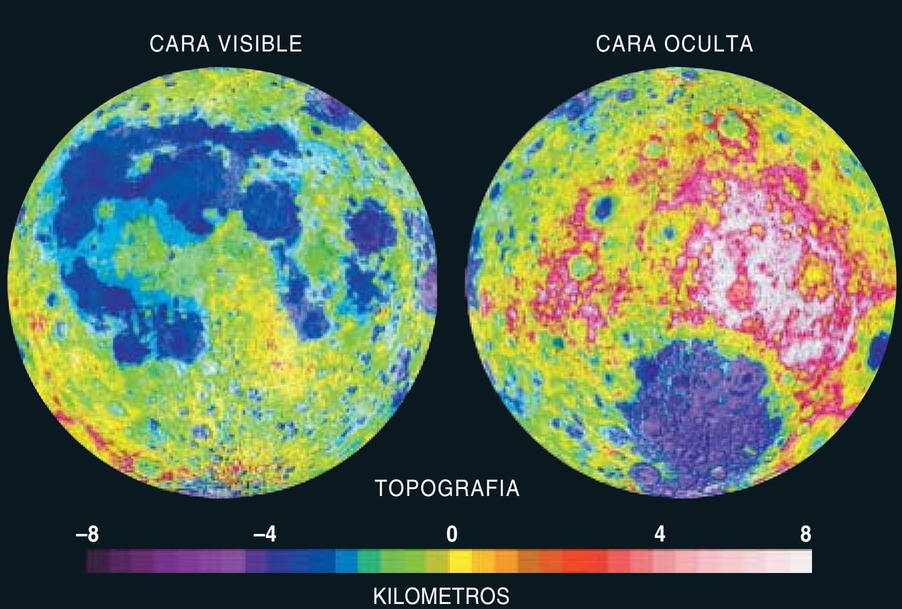
Los mares se reconocen por su color oscuro; sin embargo, también hay

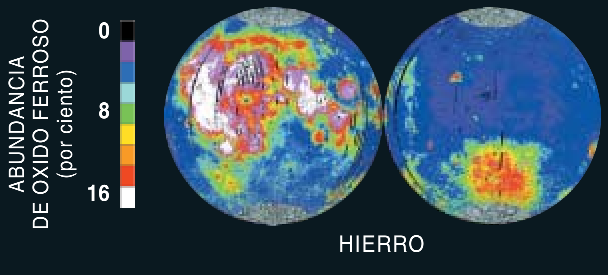
El autor

PAUL D. SPUDIS pertenece al Laboratorio de Física Aplicada de la Universidad Johns Hopkins. Desde 1982 es investigador principal del programa de Geología Planetaria de la Oficina de NASA para las Ciencias Espaciales; se ha especializado en la investigación de impactos y volcanismo planetarios. Codirigió el equipo científico de la misión Clementine.

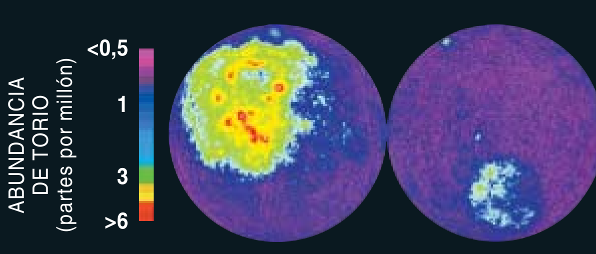
Los mapas de la Luna

GRACIAS A LAS OBSERVACIONES de las naves Clementine y Lunar Prospector se han confeccionado los primeros mapas globales detallados de la superficie lunar. Clementine llevaba un láser que medía la distancia a la superficie una vez por segundo en cada una de sus órbitas polares. Los resultados manifestaron la enorme extensión de la depresión Aitken del Polo Sur (mancha violácea de la cara oculta): ese impacto se extiende a lo largo de más de 2600 kilómetros de diámetro.

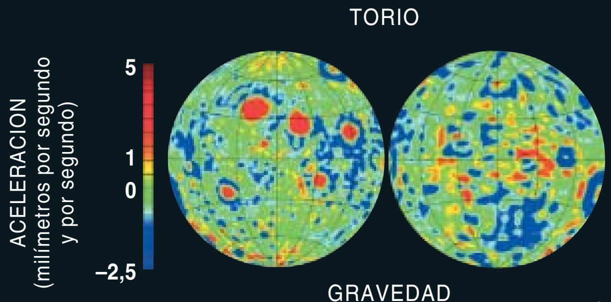




LAS CAMARAS DE CLEMENTINE tomaron imágenes en once longitudes de onda diferentes, del visible e infrarrojo cercano. Con los datos de dos de estas longitudes de onda (750 y 950 nanómetros), se ha elaborado el mapa de la concentración de hierro en los suelos de la superficie lunar. Los niveles de hierro más altos se dan en los mares de la cara visible; los más bajos en la parte central de la cara oculta (por encima de la depresión Aitken del Polo Sur).

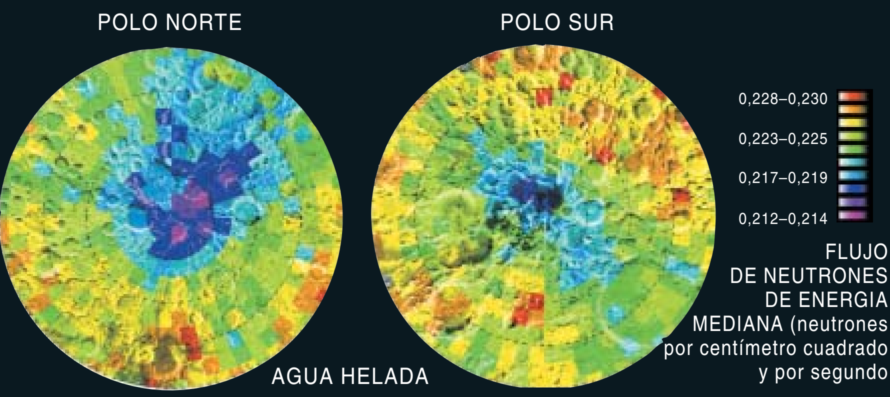


EL LUNAR PROSPECTOR midió con un espectrómetro de rayos gamma la abundancia de 10 elementos en la corteza de la Luna. El torio fue uno de ellos; se asemeja a las trazas de elementos englobadas bajo el acrónimo KREEP: no se integra bien dentro de la estructura cristalina de los minerales de las rocas comunes. Los mayores niveles de torio se encuentran en el *Oceanus Procellarum*, en la cara visible, pero se desconoce la razón de esta distribución inusual.



AL DESCRIBIR UNA ORBITA que llegaba a estar sólo 7 kilómetros de la superficie lunar, el Lunar Prospector pudo medir con precisión las variaciones de la gravedad lunar. El seguimiento de la órbita de la nave descubrió zonas con una gravedad mayor de la esperada (*color rojo*) al sobrevolar algunas de las depresiones más recientes. Una posible explicación es que ciertas infiltraciones de roca densa del manto lunar emergieran a la superficie de las depresiones tras los impactos que crearon éstas.

EL LUNAR PROSPECTOR también halló rastros de agua helada en los polos de la Luna. Su espectrómetro de neutrones encontró un flujo de neutrones de media energía que rebotaba sin cesar en las regiones en sombra perpetua (color morado). El hielo frena a los neutrones al chocar éstos contra los átomos de hidrógeno de las moléculas de agua. Estos resultados confirmaron el hallazgo por Clementine de hielo en esos lugares oscuros.



FLUJO DE NEUTRONES DE ENERGIA MEDIANA (neutrones por centímetro cuadrado y por segundo

PAUL D. SPUDIS E INSTITUTO LUNAR Y PLANETARIO (*mapas topográfico, de hierro y de torio*); IMPRESO CON PERMISO DE A. S. KONOPLIV *ET AL.* EN *SCIENCE*, VOL. 281, PAGINAS 1476–1480, 1998 (*mapa de gravedad*), Y W. C. FELDMAN *ET AL.* EN *SCIENCE*, VOL. 281, PAGINAS 1496–1500; 1998 (*mapa de agua helada*);

ciertas regiones de las tierras altas con una reflectancia intermedia y un alto contenido en hierro. Algunas de estas superficies no son más que depósitos de mar, recubiertos por alfombras de cascote de las tierras altas: capas de rocas proyectadas por los impactos que crearon las depresiones. Estas lavas de mares son más antiguas que las capas de desechos de las tierras altas, que se depositaron durante la creación de las depresiones, hace 3800 millones de años; por tanto, las erupciones de lava en la Luna comenzaron mucho antes de que se produjesen las coladas de mar de las que tomaron muestras los Apolo. El mapa global de la Luna demuestra que las coladas más antiguas abundan en la cara oculta y en el limbo (el borde entre las caras oculta y visible).

Un mundo accidentado

La Luna es abrupta. La diferencia de altura entre el punto más bajo de su superficie (en la depresión Aitken) y el más alto (en el borde de la depresión Korolev, de la cara oculta) es de más de 16 kilómetros. En la Tierra, donde la máxima diferencia de altitud es de unos 20 kilómetros, la topografía superficial resulta de la actividad tectónica que levanta cadenas montañosas y abre fosas en el fondo del océano. La Luna, por el contrario, tiene una envoltura estática; la corteza lunar ha permanecido rígida y fría durante, al menos, los últimos cuatro mil millones de años. El relieve topográfico lunar se debe por completo a los cráteres y a las depresiones. No es, por tanto, una coincidencia que la mayor depresión sea también el lugar de las diferencias de altitud más extremas, aunque sorprende que esta estructura tan grande y antigua conserve aún su forma original.

Internamente, la Luna también parece bastante irregular. El rastreo por radio de Lunar Prospector, cuya baja órbita le acercaba incluso a sólo 7 kilómetros de la superficie, halló una gravedad más intensa de lo esperado cuando sobrevolaba algunas de las depresiones más jóvenes. No se cree que los basaltos sean el origen de las anomalías gravitatorias; cada colada de lava parece muy delgada (de unos pocos metros a unas decenas de metros); las acumulaciones totales no pasan de los 200 metros. Parece que las concentraciones de masa consisten en infiltraciones de roca densa procedentes del manto lunar; emergieron a la superficie de las depresiones después del impacto.

La curiosa división del terreno lunar, con la cara visible llena de mares oscuros y la cara oculta repleta de tierras altas brillantes, podría tener su explicación en diferencias estructurales ocultas bajo la superficie. Aunque no se ha zanjado todavía la cuestión, la razón más probable de esa diferencia entre las caras es que la corteza de la cara visible sea más delgada que la corteza de la cara oculta; los magmas ascendentes atravesarían, pues, con más facilidad la superficie de la cara visible. La gran depresión Aitken del Polo Sur contiene la mayoría de las lavas de mar de la cara oculta, pero incluso esos depósitos son muy finos y no demasiado extensos: en su mayor parte está casi vacía de lava, que abunda en cualquier depresión de la cara visible, por pequeña que sea.

El mapa topográfico generado por el medidor de distancias por láser de Clementine reveló las enormes dimensiones de la depresión Aitken: con un diámetro de 2600 kilómetros, no hay mayor impacto en todo el sistema solar. Clementine también encontró otras muchas depresiones —entendiendo por tales los impactos con diámetros de más de 300 kilómetros—, algunas de las cuales eran desconocidas. Se calcula que hay en la Luna más de 45. De acuerdo con las densidades de cráteres dentro de las depresiones, la Aitken del Polo Sur parece la más antigua y Orientale, la más joven.

Sólo se conocen las edades absolutas de las depresiones que fueron visitadas por las misiones Luna y Apolo. La datación radioisotópica de las muestras de rocas que se fundieron cuando un asteroide o cometa chocó contra la Luna —reveladoras, por tanto, del momento del impacto—, nos dice que las depresiones se formaron en un intervalo de tiempo muy corto, entre hace 3800 y 3900 millones de años. De esta igualdad de edades se deduce que la Luna experimentó un número elevadísimo de impactos en un tiempo muy breve: el "cataclismo lunar".

Pero, ¿cómo pudo ocurrir tal diluvio? Los modelos de las primeras etapas de la historia del sistema solar predicen que la frecuencia de impactos disminuyó hace más de 4000 millones de años, ya que la mayoría de los planetesimales —pequeños cuerpos rocosos nacidos de la nebulosa solar— fueron expulsados del interior del sistema o absorbidos por los planetas exteriores. Si se confirma que el cataclismo lunar sucedió realmente, las consecuencias serían profundas para la historia de los planetas interiores. Es posible, por ejemplo, que hará unos 3900 millones de años se rompiera un objeto muy grande del cinturón de asteroides, cuyos restos fueran barridos hacia el sistema Tierra-Luna. Si aconteció así, la historia de los cráteres lunares no se habría repetido en otra parte y no valdría como guía para la datación de los demás planetas, aparte de la Tierra.

Para confirmar la realidad del cataclismo lunar, puede medirse la edad absoluta de la depresión Aitken del Polo Sur. No hay otra más antigua; se trata de la mayor depresión cuya edad se ha determinado mediante muestras fundidas de impactos es el Mar de la Serenidad, al que se le calcula una edad de 3870 millones de años. El impacto que dio lugar a la depresión Aitken ocurrió, sin duda, después de que se solidificara la corteza lunar; de eso hace unos 4300 millones de años.

NASA

La edad de la depresión ha de encontrarse entre estos dos valores; pero, ¿más cerca de cuál?

Si la depresión Aitken tiene una edad parecida a la de otras depresiones, se contaría con un sólido argumento a favor del cataclismo lunar. Pero si la edad de la depresión Aitken se acerca más a la de la solidificación de la corteza, no habrá necesidad de postular un cataclismo lunar. La historia de los cráteres de la Luna se podría entender como una prueba de la caída exponencial de la frecuencia de los impactos. En ese caso, la historia lunar serviría de guía para la interpretación de los cráteres de los planetas interiores, de Marte en concreto. Para datar la depresión Aitken, no obstante, hay que obtener muestras del impacto.

Quizás el resultado más atractivo de las misiones Clementine y Lunar Prospector fuese la detección de agua helada en los polos de la Luna. El eje de rotación lunar está inclinado 1,5 grados; es casi perpendicular al plano orbital del sistema Tierra-Sol. Visto desde la Luna, el Sol siempre se halla cerca del horizonte. (El eje de rotación de la Tierra tiene una inclinación de 23 grados.) El Sol iluminará siempre cualquier lugar próximo al polo lunar que se encuentre más de 600 metros por encima de la elevación media de la superficie. Si un punto no llega a esos 600 metros de altitud, permanecerá en una sombra perpetua. Esas regiones sin luz cuentan sólo con dos fuentes de calor: la pequeña desintegración radiactiva del interior lunar y la débil radiación cósmica. Llevan así desde hace 2000 o 3000 millones de años. Estas trampas gélidas, con temperaturas del orden de –223 a –203 grados, acumularían el agua helada de los cometas y meteoritos que golpearon la Luna: nunca la evaporaría la luz del Sol.

Aunque la misión Clementine no llevaba a bordo instrumentación específica para detectar el hielo polar, el equipo científico improvisó un experimento con el transmisor de radio de la nave. Las superficies rocosas dispersan las ondas radio de forma aleatoria; el hielo, en parte absorbe las ondas y en parte las refleja coherentemente. Cuando Clementine dirigió las ondas de radio hacia las regiones del Polo Sur en sombra permanente, las señales reflejadas fueron las propias de una superficie helada. Cuatro años más tarde, el espectrómetro de neutrones del Lunar Prospector observó grandes cantidades de hidrógeno en las regiones oscuras de los dos polos; debió de detectar, es la explicación más verosímil, el hidrógeno del agua helada. Las estimaciones actuales apuntan a que existen más de diez mil millones de toneladas de hielo, con un grosor de unos 30 centímetros, en la superficie de ambos polos. Se desconoce el estado físico de este material, su composición exacta, pureza o accesibi-

Regreso a la Luna

El resurgir de un nuevo interés científico por la Luna ha movido a las agencias espaciales a proyectar nuevas misiones lunares.

Nave	País	Fecha de lanzamiento	Masa sin combustible (kilogramos)	Investigación en la Luna
MISIONES PASADAS Y PRESENTES				
Clementine	EE.UU.	25 de enero de 1994	227	Empleó cámaras y medidores de distancia por láser para cartografiar la topografía y la composición superficial. Un experimento de radar encontró la primera prueba de que había agua helada en los polos.
Lunar Prospector	EE.UU.	7 de enero de 1998	158	Los espectrómetros midieron las abundancias de los elementos en la corteza y detectaron más hielo. Un magnetómetro y un reflectómetro de electrones determinaron los campos magnéticos.
SMART-1	Agencia Espacial Europea	27 de septiembre de 2003	280	A su llegada a la Luna a principios de 2005, una cámara y unos espectrómetros registrarán los minerales y examinarán los cráteres oscuros en busca de hielo.
MISIONES FUTURAS				
Lunar A	Japón	Agosto-Septiembre de 2004	520	La nave enviará dos penetradores que se introducirán bajo la superficie en dos puntos opuestos de la Luna. Los sismómetros y los sensores de temperatura examinarán el interior lunar.
SELENE	Japón	2005	1600	Un conjunto de cámaras, espectrómetros y otros instrumentos cartografiarán la composición superficial, la topografía y los campos magnético y gravitatorio con mayor detalle.
Envío a la Tierra de las muestras de la depresión Aitken del Polo Sur	EE.UU.	Antes de 2010	Por determinar	Una sonda robótica recogerá muestras de rocas y tierra del suelo de la depresión; los enviará de vuelta a la Tierra para el análisis de su edad y composición.

INSTITUTO LUNAR Y PLANETARIO

lidad. Este conocimiento se puede adquirir sólo con misiones futuras a la Luna.

Las imágenes tomadas por Clementine muestran también que algunas regiones cercanas a los polos lunares reciben iluminación solar de forma casi constante. Una zona próxima al borde del cráter Shackleton permanece iluminada durante más del 75 % del período de rotación de la Luna. Lugares así cuentan con un entorno térmico algo más benigno, con temperaturas superficiales de entre –60 y –40 grados. (La temperatura del ecuador de la Luna oscila entre los –150 y los –100 grados.) Establecer una estación, con personal o no, en una de estas regiones iluminadas próximas a los polos facilitaría la supervivencia de los dispositivos en las temperaturas extremas de la superficie lunar. Y si se pudiera recoger el hielo de alguna zona oscura cercana, la base dispondría de una fuente de agua que mantendría vidas humanas o valdría como combustible para cohetes (mediante la ruptura del agua en hidrógeno líquido y oxígeno, los dos combustibles químicos más poderosos).

Regreso a la Luna

Como resultado del éxito de Clementine y Lunar Prospector, nuevas misiones se encuentran ahora en diferentes estados de preparación. En septiembre de 2003 la Agencia Espacial Europea lanzó la nave SMART-1, a fin de probar un motor de propulsión iónica durante su viaje de 16 meses a la Luna. SMART-1 porta una cámara y un sensor de rayos X para cartografiar la superficie de la Luna. La sonda japonesa “Lunar A”, arrojará contra la superficie dos “penetradores” equipados con sismómetros y sensores de temperatura. Reunirán información acerca del interior lunar y posiblemente confeccionarán un mapa de su núcleo. Japón piensa ampliar esta misión con una nave mayor, SELENE, que escrutará la Luna con más detalle mediante espectrómetros de rayos X y rayos gamma, una cámara de terreno, un altímetro láser y un radar sonda.

Además, la reciente importancia conferida a la depresión Aitken del Polo Sur ha dado nueva vida a la idea de que alunice allí una nave que recoja muestras y las envíe a la Tierra para ser analizadas. El objetivo principal de esta misión consistiría en la obtención de muestras del material fundido por el impacto de la depresión Aitken. Si se consigue determinar cuándo se formó la depresión, estas rocas responderían a la pregunta de si hubo o no un cataclismo lunar. Es más, puesto que el material fundido mezcla todas las rocas golpeadas por el asteroide o cometa, su estudio podría revelar la composición y la estructura de la corteza lunar en la depresión. Algunos piensan que el objeto que se estrelló contra la Luna debió de penetrar en la corteza y dejar al descubierto partes del manto externo, quizás a profundidades de hasta 120 kilómetros. Si la colada del impacto contiene material del manto, podremos caracterizar con cierto detalle la composición del interior de la Luna.

Los planificadores de la misión deben seleccionar para el alunizaje, en la depresión Aitken, un sitio donde se puedan recoger muestras que resuelvan las dudas sobre la edad y composición de dicha estructura. La información proporcionada por sensores remotos identifica las zonas más oportunas en virtud de su composición y situación geológica. Se hallan en la cara oculta de la Luna: la sonda debería operar por su cuenta o comunicarse con los controladores terrestres por medio de un satélite repetidor.

La sonda debería obtener tanto rocas como tierra del lugar del alunizaje. Se necesitan las rocas para la datación y el estudio de la mineralogía de las muestras; con la tierra se determina si las rocas recogidas son o no representativas de la zona. (La tierra también contiene pequeños fragmentos de rocas poco corrientes.) Las muestras se cargarían en un pequeño vehículo, llevado hasta allá por la sonda. Gracias a su propio motor cohete, regresaría a la Tierra; la atmósfera lo frenaría, aterrizaría en algún lunar remoto y emitiría una señal de radio para que el equipo de recuperación lo localizara. No sería una misión sencilla, pero cae dentro de lo hoy posible.

La NASA ya ha pedido propuestas para su ejecución. Se podría lanzarla antes de 2010. Pero, ¿cuándo regresarán los astronautas a la Luna? Hay numerosas razones científicas que apoyan la exploración humana. Constituiría una oportunidad excelente para un gran número de estudios en campos diversos, desde la exploración planetaria hasta la astronomía. Y la existencia de agua helada en los polos lunares facilita mucho la presencia humana permanente. La NASA ha esbozado ya algunas ideas, encaminadas a que pudieran realizarse nuevas misiones tripuladas a la Luna con la infraestructura actual de lanzamiento y transporte; se ahorrarían así miles de millones de dólares.

[El 14 de enero anunciaba el presidente Bush el propósito de volver a llevar seres humanos a la Luna para el 2015.]

NASA

Bibliografía complementaria

THE ONCE AND FUTURE MOON. Paul D. Spudis. Smithsonian Institution Press, 1996.

A NEW MOON FOR THE TWENTY-FIRST CENTURY. G. Jeffrey Taylor en *Planetary Science Research Discoveries*, agosto de 2000.

LUNAR METEORITES AND THE LUNAR CATACLYSM. Barbara A. Cohen en *Planetary Science Research Discoveries*, enero de 2001.

THE CLEMENTINE ATLAS OF THE MOON. D. Ben J. Bussey y Paul D. Spudis. Cambridge University Press, 2004.

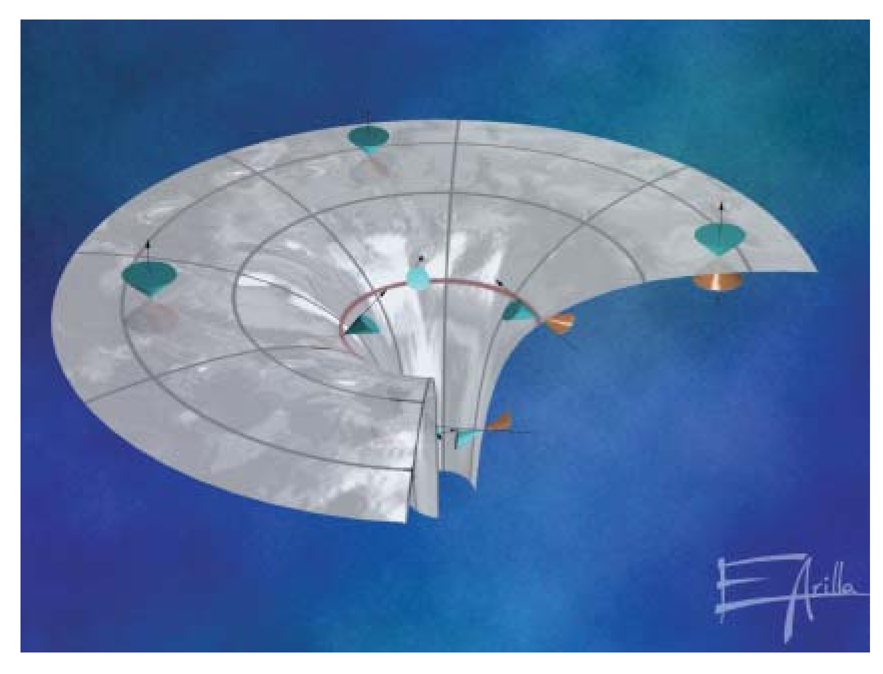
Agujeros negros en condensados de Bose-Einstein

Los condensados de Bose-Einstein nos ofrecen la posibilidad de experimentar en laboratorios terrestres con "maquetas en miniatura" de objetos celestes tan esquivos como los agujeros negros

Carlos Barceló y Luis J. Garay

Estamos acostumbrados a recibir noticias sobre nuevos avances de la manipulación de materiales a escalas microscópicas, en las que su comportamiento desafía nuestras intuiciones. En el otro extremo, a grandes escalas, la astronomía no se queda atrás a la hora de dejarnos sorprendidos con la riqueza de sus estructuras y los avances en su observación. ¿Guardan estas dos disciplinas alguna relación? Por extraño que parezca, la respuesta es afirmativa. Como se ha visto recientemente, la técnica y las teorías físicas que describen los materiales pueden utilizarse para crear en laboratorios terrestres "maquetas en miniatura" de objetos de interés astrofísico; estos modelos reciben el nombre de "análogos de la relatividad general". En este artículo vamos a concentrarnos en un caso paradigmático que conecta algunos de los últimos avances de la física de la materia condensada con los objetos quizá más llamativos del firmamento: la simulación de un agujero negro en un condensado de Bose-Einstein.

Un condensado de Bose-Einstein es un estado especial de la materia en el que un conjunto de átomos con espín entero se comporta cohe-



1. LOS CONOS DE LUZ describen las trayectorias espacio-temporales de los rayos de luz. En la figura, la dirección temporal es perpendicular a la superficie dibujada. En un agujero negro, la luz emitida desde cualquier punto del exterior suficientemente alejado del horizonte de sucesos puede viajar en cualquier dirección del espacio, con otras palabras, los conos de luz son casi perpendiculares a la superficie espacial que representa al agujero negro. En el interior, los conos de luz están inclinados respecto a la perpendicular y, por tanto, la luz sólo puede caer hacia el interior; no puede escapar. El horizonte es la superficie límite en la que una de las generatrices del cono de luz es perpendicular a la superficie; se halla, pues, formado por el conjunto de todas las trayectorias luminosas que no pueden ni escapar ni caer en el agujero negro y que, por tanto, se mueven eternamente en ese límite.

E. ARILLA

2. EN UNA CASCADA como la de la figura, la velocidad del flujo (*representada por las flechas*) se hace supersónica a partir de una cierta circunferencia límite. Fuera de este horizonte de sucesos acústico, las ondas sonoras emitidas en un cierto punto pueden viajar en todas las direcciones. Sin embargo, una vez sobrepasado el horizonte, el flujo es demasiado rápido y el sonido se ve arrastrado por él. El horizonte de sucesos acústico puede definirse, de manera análoga al de un agujero negro, como el conjunto de todas las trayectorias del sonido que no pueden escapar hacia el exterior, ni caen irremediablemente en la cascada: se mueven eternamente en ese límite.



rentemente, como los fotones en un haz de luz láser. La naturaleza cuántica del mundo atómico hace que toda partícula posea una cantidad de momento angular intrínseco (su espín) múltiplo entero o semiimpar de una unidad fundamental, la constante de Planck $\hbar$; su comportamiento será muy diferente en uno y otro caso. Solamente las partículas con espín entero, denominadas bosones, pueden llegar a comportarse de una forma coherente. A pesar de que este comportamiento fue predicho por Albert Einstein y el físico hindú Satyendra Nath Bose en 1924, su observación experimental se resistió a lo largo del tiempo debido a que una pequeña agitación térmica es suficiente para destruir el comportamiento coherente del colectivo de bosones. Finalmente, en 1995, el grupo de la Universidad de Colorado dirigido por Eric Cornell y Carl Wieman consiguió enfriar un gas de átomos de rubidio lo suficiente como para observar la aparición del comportamiento coherente (por ello, Cornell y Wieman recibieron el año 2001 el premio Nobel de física, junto a Wolfgang Ketterle, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, autor de importantes experimentos de condensación de átomos de sodio).

Nos interesa aquí explicar cómo, en un futuro cercano, podría prepararse un condensado de Bose-Einstein (un conjunto de cientos de miles de átomos condensados en una región de décimas de milímetro) en un estado con un comportamiento análogo al de un agujero negro. De la misma forma que cualquier emisión de luz desde el interior de un agujero negro no puede nunca observarse desde su exterior, puesto que queda atrapada (*véase la figura 1*), la configuración análoga a un agujero negro en un condensado haría que cualquier emisión de ondas sonoras (perturbaciones en la densidad del condensado) desde su interior no pudiera percibirse desde el exterior (*véase la figura 2*). Debido a que la analogía utiliza las ondas sonoras en lugar de las luminosas, estos "agujeros negros" se han llamado en ocasiones agujeros negros acústicos o agujeros silenciosos.

Pero, ¿qué objeto tendría crear estas maquetas en miniatura de agujeros negros? Los importantes desarrollos sobre la física de los agujeros negros que nos ha deparado el último cuarto del siglo XX han sido de un carácter completamente teórico, sin mediar ninguna prueba experimental. La experimentación directa e incluso la mera observación de muchos de los fenómenos relacionados con los agujeros negros está fuera de nuestro alcance. En una "maqueta a escala" podemos, en cambio, estudiar en detalle incluso regímenes cuyo equivalente real nos es completamente desconocido, puesto que entendemos muy bien la física que se halla detrás de estos sistemas de laboratorio. La analogía, manejada con cuidado, ha sido una herramienta fundamental en la historia del pensamiento humano. Es de esperar que el intercambio de ideas y formalismos entre campos de la física tan desarrollados nos ayude una vez más a profundizar en nuestro conocimiento del mundo físico.

Agujeros negros y radiación de Hawking

Los agujeros negros guardan escondida en su interior la respuesta a una de las preguntas más importantes de la física teórica actual: ¿cuál es el destino final de la materia en el universo? En la cadena de la evolución estelar, unos sistemas se transforman en otros a lo largo de un proceso que conserva la energía pero causa un aumento constante e irreversible de la entropía (una medida del desorden con que se distribuye la energía). La combustión nuclear en una estrella como nuestro Sol y la consiguiente emisión de radiación pueden verse simplemente como la conversión de una energía muy ordenada, en forma de materia, en energía desordenada, que toma la forma de fotones dispersos por el universo. La energía contenida en estos fotones de una frecuencia relativamente elevada (relacionada de manera directa con la temperatura de la estrella emisora) puede de-

E. ARILLA

sordenarse más aún si se redistribuye en una mayor cantidad de fotones de menor frecuencia, y así sucesivamente, hasta confundirse con la radiación cósmica de fondo —con una temperatura de 2,7 grados Kelvin—. La vida misma en la Tierra debe su existencia a su papel de catalizador en esta cadena universal de aumento entrópico

Cuando una estrella agota sus varias fases de combustión nuclear, puede acabar como un pedazo inerte de materia, que se enfriará hasta alcanzar la gélida temperatura de fondo. Este sería el final del aprovechamiento de la energía organizada contenida en la extinguida estrella. Lo que resulta fantástico es que al agrupar varios de estos remanentes, como la atracción gravitatoria se encarga de hacer por nosotros, se puede volver a entrar en una nueva fase radiativa, tal vez definitiva, en la que quizá toda la energía de los remanentes terminaría transformada en radiación. A ello acaba por conducir la formación de un agujero negro.

Una vez que una estrella de masa superior a una cierta masa crítica agota su combustible nuclear, ninguna forma conocida de presión puede evitar que la estrella colapse bajo su propia atracción gravitatoria y forme un agujero negro. La característica más intrigante y definitoria de este objeto es la existencia de una superficie esférica límite (en el caso más sencillo en que no haya rotación) donde la atracción gravitatoria se hace tan fuerte, que nada puede escapar de allí: para un hipotético habitante de esta superficie incluso la emisión, desde ella hacia el exterior, de un fotón, cuya velocidad es la máxima alcanzable, se vería frustrada. Esta superficie límite constituye el "horizonte de sucesos" de un agujero negro. El diámetro del horizonte de sucesos es proporcional a la cantidad de materia que colapsó para formarlo. Por ejemplo, un agujero negro con una masa equiparable a la del Sol tendría un diámetro de tan sólo 6 kilómetros (en vez del millón de kilómetros de nuestro astro).

El horizonte de sucesos de un agujero negro no está determinado por nada material. Tal y como se entiende desde el nacimiento de la teoría de la relatividad general, la gravedad no es más que una deformación del espacio y del tiempo. Aunque en la discusión que sigue no vamos a utilizar ningún concepto geométrico, baste decir que el horizonte de sucesos no es más que la esfera límite donde la geometría espaciotemporal se curva de manera tal, que cualquier rayo de luz apunta hacia su interior (*véase la figura 1*).

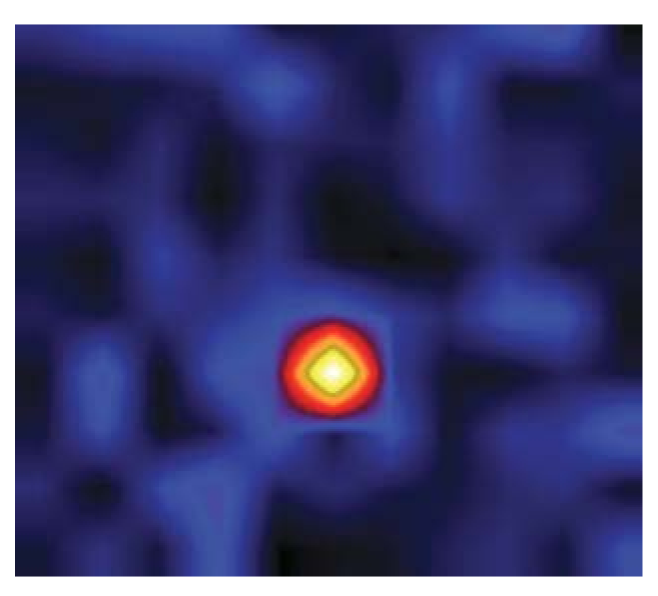
En situaciones reales, el colapso de la materia en una cierta región del espacio daría lugar primeramente a agujeros negros en rápida rotación. La conservación del momento angular de un sistema hace que cualquier rotación presente en la nube de materia que se desploma vaya acelerando su ritmo conforme el colapso avanza (piénsese en un patinador artístico que recoge sus brazos para acelerar su ritmo de giro). Un agujero negro puede acumular en forma de rotación hasta un 29 % de su energía total y, lo que es más interesante, esta energía puede ser extraída del sistema, puesto que se acumula fuera del horizonte de sucesos. A partir de complejos procesos físicos, que no vamos a detallar aquí, la violenta caída del resto de la materia de la zona circundante sobre un agujero negro que rota pone en marcha un nuevo mecanismo de extracción de energía del sistema, mucho más eficaz que la combustión nuclear. Se cree que este mecanismo está detrás de las fuertes emisiones de radiación de cuásares y radiogalaxias. Pero, ¿qué sucede cuando también este mecanismo deja de actuar?

En un principio, se pensó que la acumulación de materia en forma de agujeros negros (sin rotación) era su destino final, pero esta conclusión descansa en un tratamiento clásico de la materia. Sabemos que la materia se comporta de forma cuántica y que su descripción clásica sólo es una aproximación, que funciona muy bien a la hora de entender fenómenos macroscópicos. En 1974, Stephen Hawking, de la Universidad de Cambridge, mostró que, debido al carácter cuántico de la materia,

E. ARILLA

3. EL VACIO ESPACIO-TEMPORAL CUANTICO está continuamente bullendo con pares de partículas y antipartículas que se crean a la vez en un punto, viven durante un corto período de tiempo y se aniquilan mutuamente en un instante posterior. En las proximidades de un agujero negro, este proceso se ve ligeramente modificado, puesto que uno de los componentes del par puede caer en el agujero negro. El otro componente puede caer también, pero tiene otra alternativa: escapar al infinito constituida en partícula real. Esta radiación de origen cuántico generada en los alrededores de un agujero negro recibe el nombre de radiación de Hawking.







4. IMAGENES DEL SISTEMA ESTELAR BINARIO Cygnus X-1. La imagen de la izquierda muestra la estrella acompañante HDE 226868 (la más brillante) de un agujero negro invisible, cuya imagen en rayos X se muestra a la derecha.

NASA

algunos fotones y otros tipos de partículas podrían escapar de la atracción gravitatoria en el horizonte de sucesos y llegar hasta nosotros en forma de una tenue radiación (*véase la figura 3*). Los agujeros negros dejaban de ser completamente negros para pasar a tener un poco de color. En concreto, su emisión de radiación electromagnética sería equivalente a la de un cuerpo negro con una temperatura proporcional al inverso del tamaño del horizonte; la longitud de onda de su color predominante estaría directamente relacionada con dicho tamaño. Para un agujero negro de masa solar, la emisión se concentraría en ondas de radio kilométricas y, por tanto, sería muy poco energética, con una temperatura asociada de unas 100 millonésimas de grado Kelvin. En contra de lo que nos sugiere la intuición, la radiación emitida por un agujero negro es tanto más energética cuanto más pequeño es éste. Para recibir radiación en el espectro visible procedente de un agujero negro, éste tendría que ser del tamaño de un átomo.

De acuerdo con la predicción teórica de Stephen Hawking, la historia de la materia no acaba con la formación de agujeros negros. Estos emiten radiación, por lo que se hacen cada vez más pequeños, se van evaporando y se calientan más y más. El resultado final de esta evaporación todavía es tema de debate. El agujero negro podría evaporarse completamente o bien terminar en un pequeño remanente que se disolvería en un mar de agujeros negros submicroscópicos virtuales. En lo que respecta a este artículo, sólo nos detendremos en la existencia de la evaporación en sí, y no en sus últimas etapas.

Agujeros negros en la naturaleza

Los agujeros negros son objetos esquivos; casi han permanecido ocultos en el dominio de la física teórica hasta nuestros días. Como hemos dicho, la única emisión de radiación que esperamos de un agujero negro es la predicha por Hawking, debida a afectos cuánticos. Para agujeros negros de tamaño astrofísico, esta emisión es tan débil, que quedaría enmascarada por el resto de emisiones del entorno del agujero negro: la propia radiación de fondo de microondas es más energética. Por lo tanto, no podemos esperar observar directamente agujeros negros. Sin embargo, los agujeros negros no están aislados en el universo, sino rodeados de materia en diferentes formas. El campo gravitatorio generado por un agujero negro es tan intenso, que deja su marca en el comportamiento de la materia de sus alrededores. Son esas marcas de su presencia las que los astrónomos llevan buscando durante los últimos 25 años, y las han encontrado en abundancia. Es necesario subrayar que ninguna de estas marcas podrá nunca asegurarnos la existencia propiamente dicha del horizonte de sucesos, pero sí de superficies con un comportamiento indefinidamente cercano al ligado a la formación de un horizonte.

El primer candidato serio a agujero negro, y el más estudiado, fue Cygnus X-1 (*véase la figura 4*), identificado por su intensa emisión en rayos X y oscuridad en el visible. Forma parte de una binaria; la estrella que la acompaña, HDE 226868, se observa con claridad en el visible. La emisión de rayos X estaría producida por los choques del material arrancado de la estrella que va cayendo en el agujero negro. Estudios dinámicos revelan que la masa de este posible agujero negro supera el triple de la masa del Sol (por encima de esta masa crítica no existen estrellas estables) y que, por tanto, no puede ser una estrella de neutrones. En la actualidad, existen decenas de candidatos como Cygnus X-1.

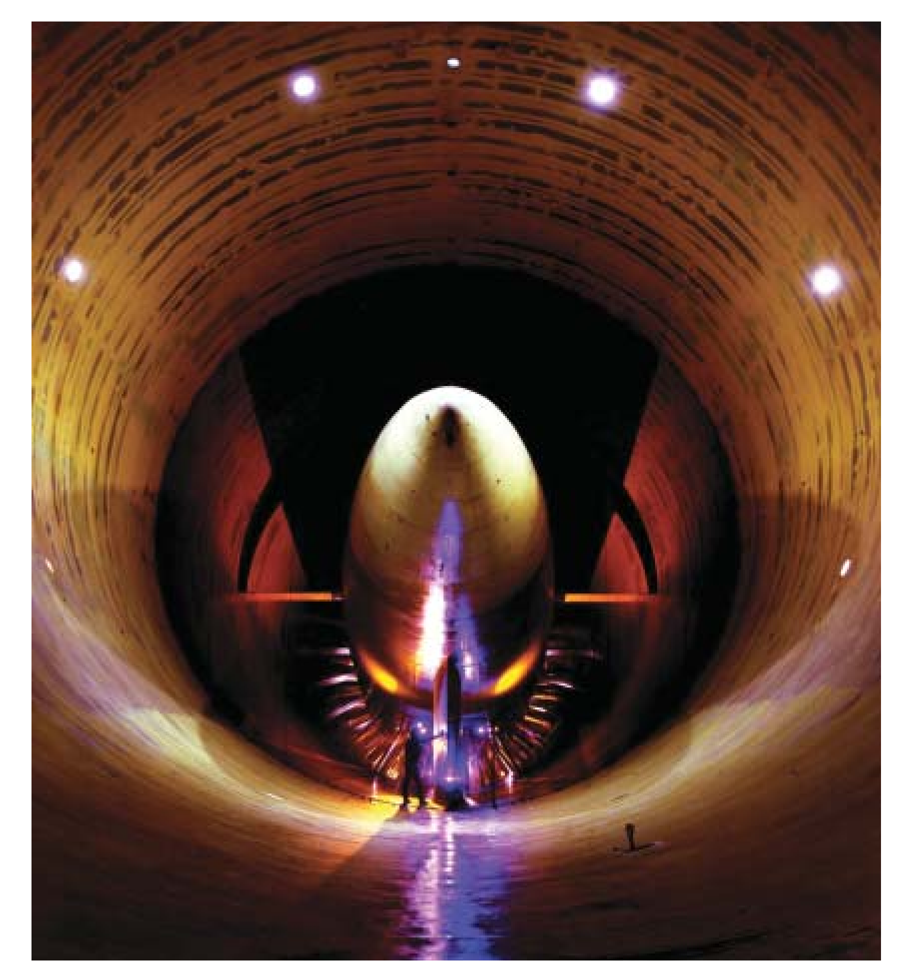
Aparte de los agujeros negros estelares, existen diversos indicios de

que los núcleos de las galaxias (en particular el de la nuestra) albergan agujeros negros gigantes. Se ha estimado que una región central de nuestra galaxia, de tan sólo 0,3 años-luz, contiene una masa equivalente a 3 millones de soles. La alta densidad de este núcleo sólo parece compatible con la presencia de un agujero negro gigante en su interior. Además, la existencia de estos agujeros negros gigantes en el centro de las galaxias, que atraen hacia sí la materia de los alrededores, se ajusta de forma satisfactoria con las potentísimas emisiones de radiación de cuásares y radiogalaxias.

Cada día tenemos más pruebas de la realidad de agujeros negros estelares y galácticos, pero comprobar la existencia de la radiación de Hawking está fuera de toda posibilidad... a no ser que ya haya sido observada. El universo tuvo que estar en el pasado mucho más caliente que en la actualidad. En un tiempo suficientemente remoto, la temperatura hubo de ser tan elevada, que incluso el propio espacio-tiempo debía comportarse de manera cuántica. Las fluctuaciones espacio-temporales podrían haber formado entonces, de manera directa, agujeros negros de diversos tamaños. Estos agujeros negros primordiales se habrían ido evaporando y calentando progresivamente. Así, en la actualidad, contaríamos en nuestro entorno galáctico con una distribución de agujeros negros primordiales con tamaños del orden de un núcleo atómico. Se hallarían en una fase de evaporación muy avanzada: emitirían un último chorro de radiación antes de desaparecer por completo. Se considera la posibilidad de que, entre las explosiones de rayos gamma que se observan todos los días con nuestros satélites, las de más corta duración (menos de 100 milisegundos) se originen en el proceso de evaporación de Hawking. Aparte de esta controvertida posibilidad, la construcción de modelos análogos a los agujeros negros en laboratorios parece la única alternativa viable.

Los autores

CARLOS BARCELO y LUIS J. GARAY iniciaron su formación en la facultad de ciencias físicas de Zaragoza y Complutense de Madrid, respectivamente. Barceló se doctoraba en 1998 en la Universidad de Granada e Instituto de Astrofísica de Andalucía (CSIC). Es Marie Curie Fellow en la Universidad de Portsmouth (Reino Unido). Sus investigaciones se centran principalmente en modelos de gravedad análoga y de gravedad en membranas. Garay se doctoró en ciencias físicas por la Universidad Autónoma de Madrid en 1992. En la actualidad es investigador contratado del Instituto de Matemáticas y Física Fundamental del Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Se ha especializado en analogías de gravedad en el laboratorio y en fluctuaciones cuánticas del espacio-tiempo.



NASA

5. TUNEL DE VIENTO transónico del Centro de Investigaciones Langley de la NASA.

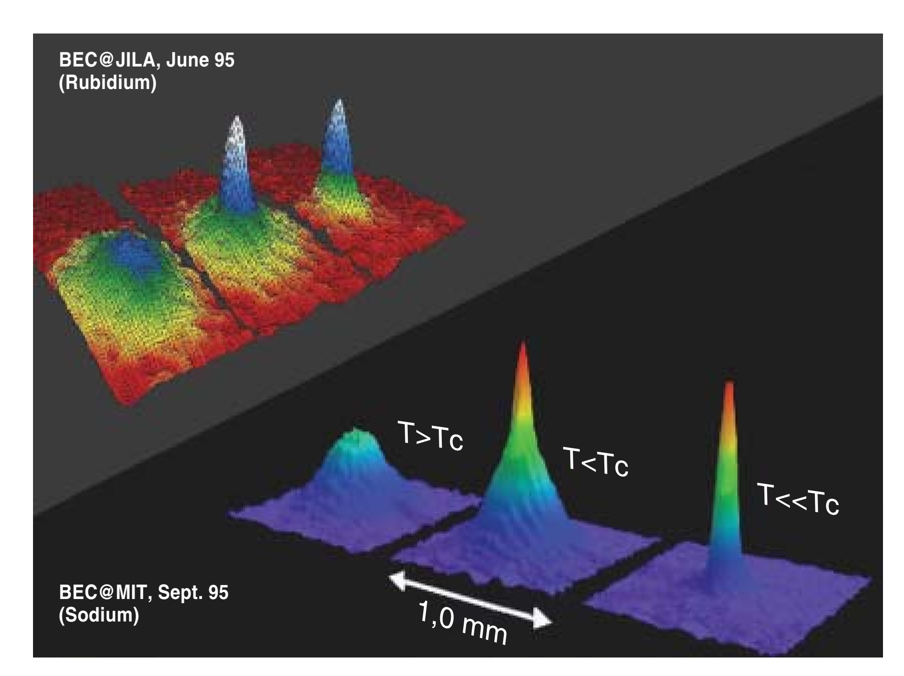
Análogos acústicos de agujeros negros y otras analogías

Los fluidos nos proporcionan una manera sencilla de imaginar cómo son los agujeros negros. Pensemos en un desagüe cualquiera de nuestras casas. Si el agua le llegase a un ritmo constante y desde todas las direcciones por igual, obtendríamos una configuración como la de la figura 2. El agua se acelera más, cuanto más nos acercamos al centro de simetría. Las ondas sonoras en el agua se propagan a una velocidad constante con respecto al agua en reposo. Llega un momento, a una cierta distancia del centro del desagüe, en que la velocidad del agua es mayor que la velocidad del sonido en el agua. A partir de ese punto (globalmente una circunferencia), el flujo del fluido es supersónico y, por tanto, ninguna onda sonora producida puede salir de la circunferencia límite. Este fenómeno es análogo al que ocurre

con la luz (y cualquier otra forma de energía) en un agujero negro (*véase la figura 1*). Por supuesto, siendo estrictos, el desagüe tendría que ser tridimensional, con el fluido cayendo radialmente hacia un punto del espacio desde todas las direcciones, para tener una superficie esférica límite en vez de una circunferencia y reproducir completamente la idea del agujero negro. Esta analogía, propuesta por William Unruh, de la Universidad de la Columbia Británica, fue elaborada por Matt Visser, de la Universidad de Washington.

La analogía es más precisa de lo que puede sugerir la descripción anterior. La atracción gravitatoria de un agujero negro se halla codificada en una distorsión de la geometría del espacio-tiempo que lo rodea. La ecuación que describe la propagación de una onda de tipo luminoso en una geometría curva, con distorsiones, resulta ser la misma que describe la propagación de una onda sonora en un fluido en movimiento. A cada distribución de materia en el universo le corresponde una geometría curva del propio espacio-tiempo, con el control sobre la propagación de cualquier tipo de señal. De manera equivalente, a cada configuración que podamos asignarle al fluido le corresponderá una geometría efectiva curva con el control sobre la propagación de las ondas sonoras. Aquí reside la analogía; no debemos extenderla más allá sin tomar precauciones. Por ejemplo, las ecuaciones de evolución de la geometría propiamente dicha son muy diferentes en el caso gravitatorio y en el del fluido. La geometría espacio-temporal tiene que satisfacer las ecuaciones de Einstein, mientras que la geometría efectiva en el fluido está determinada por las ecuaciones de Euler de la hidrodinámica.

El punto crucial estriba en lo siguiente: la radiación de Hawking de un agujero negro debe su existencia a la forma específica de la geometría espacio-temporal curvada que lo define y no a ningún efecto dinámico de esta geometría. Por tanto, dada una geometría análoga en un fluido, esperamos la existencia del análogo de la radiación de Hawking. La emisión de partículas luminosas —fotones— será sustituida por la emisión de fonones, partículas (cuantos) de sonido.



6. RESULTADOS DE LOS PRIMEROS EXPERIMENTOS en los que se obtuvieron condensados de Bose-Einstein, llevados a cabo por el grupo de Cornell y Wieman (*figura de arriba*) y por el grupo de Ketterle (*figura de abajo*). Estas figuras muestran las distribuciones de velocidades y posiciones respectivamente de los átomos a distintas temperaturas: por encima de la temperatura crítica a la que tiene lugar la condensación, a la temperatura crítica y por debajo de la misma. Se observa que, cuando el condensado ya se ha formado, la mayoría de los átomos están concentrados en una región muy pequeña del espacio y poseen una velocidad también muy pequeña.

JILA, MIT

Hay muchas propuestas diferentes sobre cómo simular aspectos de la física de agujeros negros en un laboratorio. Un estudio general llevado a cabo por uno de los autores concluye que la esencia de casi todo modelo análogo de la relatividad general reside en la separación de una teoría de un medio continuo arbitrariamente complicada en dos partes: una configuración de fondo (el fluido en movimiento) y unas perturbaciones de esta configuración (las ondas de sonido).

Entre las distintas propuestas, cabe destacar las basadas en la propagación de cuasipartículas en helio superfluido, así la sugerida por Grigory Volovik, de la Universidad de Helsinki, y Ted Jacobson, de la Universidad de Maryland, por una parte, y las que toman como sistema los condensados de Bose-Einstein, por otra. Por motivos que quedarán claros más adelante, nosotros estamos interesados en estas últimas, que a su vez pueden ser de dos tipos. En la sorprendente facilidad con que se manipula la velocidad de propagación de la luz en un condensado se han apoyado Ulf Leonhardt, de la Universidad de St. Andrews, y sus colaboradores para reducirla hasta lograr que la diferencia entre la velocidad del propio condensado y la de un rayo de luz que se propague contra corriente sobre él se anule, dando lugar al análogo de un horizonte de sucesos. Finalmente, la propagación de ondas sonoras en un condensado en movimiento proporciona, como ya hemos visto, una posibilidad de simular agujeros negros acústicos, punto central de este artículo, en cuya investigación y desarrollo los autores y sus colaboradores participamos.

Agujeros silenciosos en la naturaleza

Hemos dicho que la observación directa del horizonte de sucesos de un agujero negro genuino queda fuera de nuestras capacida-

des actuales y futuras. Antes de pasar a explicar cómo construir el análogo de un horizonte de sucesos en un condensado de Bose-Einstein, conviene recordar que se han observado ya en la naturaleza al menos tres tipos de horizontes de sucesos acústicos.

El Sol radia hacia su exterior una nube de partículas cargadas a velocidades del orden de 400 kilómetros por segundo. Este viento de partículas es el responsable de las auroras boreales y de que la cola de los cometas se oriente radialmente y de espaldas al Sol. La densidad y presión de dicho fluido disminuye conforme nos alejamos del Sol y, por tanto, también la velocidad del sonido en su interior. A una distancia de unos pocos radios solares, la velocidad del viento supera la del sonido; se produce un flujo supersónico y, por tanto, un horizonte acústico.

Otra situación en la que se ha observado la formación de un horizonte acústico es en los procesos astrofísicos de agregación de material, el llamado acrecimiento de Bondi-Hoyle. En este caso, estamos ante una situación invertida a la del viento solar. Un objeto central de masa muy grande va atrayendo y agregándose las capas de material fluido de sus alrededores. A medida que el fluido va cayendo, acelera hasta llegar a velocidades superiores a las del sonido y forma así un horizonte acústico.

Por último, ¿qué sucede en los túneles de viento supersónicos diseñados para investigar la aerodinámica de los aviones (*véase la figura 5*)? Como su nombre indica, en estos túneles de viento un flujo de aire es acelerado hasta velocidades supersónicas; se crea, por tanto, un horizonte acústico, en cuanto se cruza el límite subsónico. La forma específica en la que ese fenómeno se logra nos ha servido de guía a la hora de estudiar configuraciones supersónicas en condensados de Bose-Einstein.

La existencia observada de estos horizontes, aunque interesante, sigue sin ayudarnos a desvelar la realidad de la esperada radiación de Hawking. Un cálculo aproximado nos dice que la temperatura de Hawking para estos tres tipos de horizontes acústicos sería mucho menor que la de un agujero negro estelar; quedaría, pues, enmascarada en su entorno mucho más energético. Veremos que no acontece así en un condensado de Bose-Einstein.

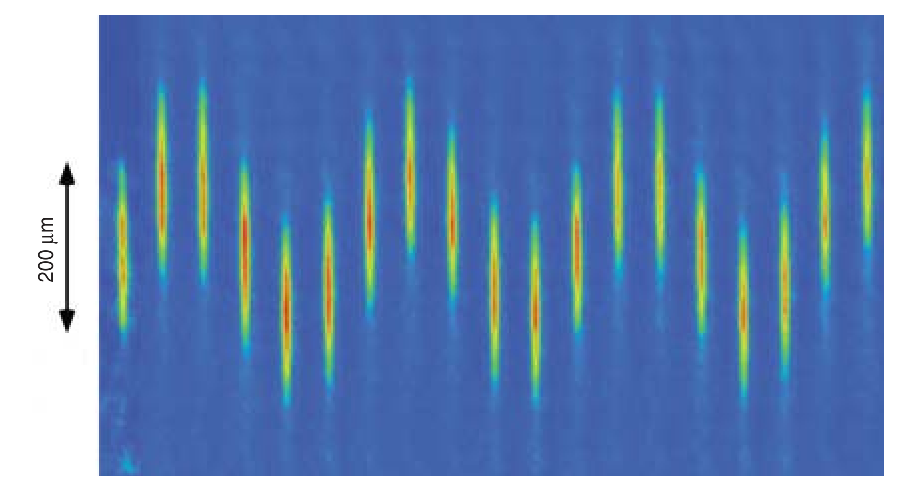
Condensados de Bose-Einstein

Como ya expusimos al comienzo del artículo, un condensado de Bose-Einstein designa un conjunto de átomos (u otras partículas bosónicas) con un comportamiento coherente. Abordémolos con mayor detenimiento.

Desde un punto de vista clásico, un objeto puede considerarse puntual cuando su tamaño es mucho menor que las escalas de longitud en las que estamos interesados. Por ejemplo, para calcular cómo lanzar una bala de cañón de 10 centímetros de diámetro para hacer blanco en un barco de 10 metros de eslora por 3 metros de manga situado a 100 metros de distancia, podemos suponer que la bala de cañón es un objeto puntual. Cuando nos adentramos en el mundo de lo muy pequeño (con respecto a nosotros, claro está) podemos asignar a cada fenómeno una escala de longitud o, lo que es lo mismo, una hipotética lupa con un número concreto de aumentos. Conforme a un punto de vista clásico, cuando el tamaño asignado (experimentalmente) a un objeto sea mucho menor que las dimensiones que pueda resolver la lupa con la que nos dispongamos a observarlo, el objeto nos parecerá, una vez bien enfocado, un punto carente de estructura. Sin embargo, a escalas atómicas, no sucede así. Lo que íbamos a enfocar en un punto, creíamos, ahora lo vemos borroso; el punto se difumina y no podemos hacer nada por evitarlo.

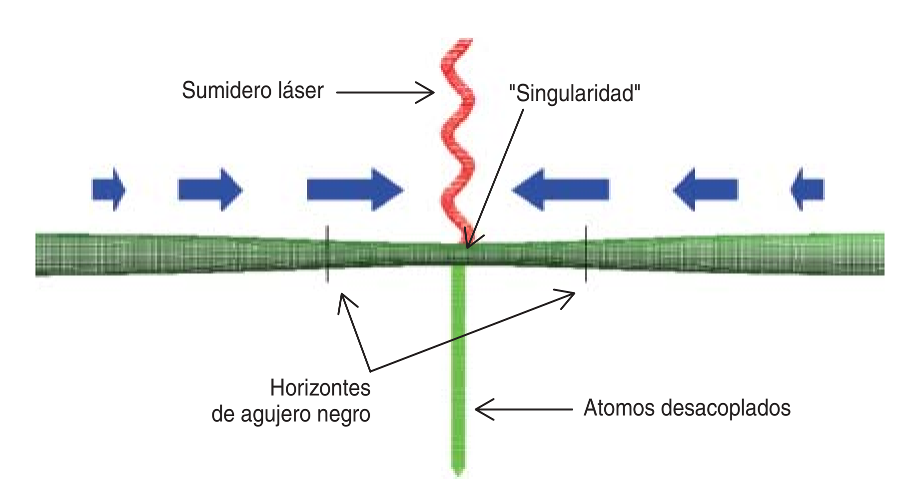
En mecánica cuántica, lo que antes era un objeto puntual en movimiento se ha convertido en un punto difuminado (como una pequeña mancha o nube), con zonas de mayor y menor intensidad que evolucionan con el tiempo. La formulación precisa de este punto difuminado recibe el nombre de función de onda del objeto. Una descripción completa en un instante de tiempo del punto difuminado necesita dos funciones de la posición: el patrón de intensidad de la mancha y el patrón de velocidad de cambio de la mancha. Estas dos funciones corresponden al módulo y a la fase de la función de onda compleja del objeto.

Cuando un sistema consta de varias partículas, la deslocalización afecta al conjunto de las posiciones de forma global. La descripción mecanocuántica de un sistema de varias partículas no nos da, en general, unos patrones de intensidad y velocidades específicos para cada partícula, sino que nos proporciona



7. MONITORIZACION de la oscilación colectiva de un condensado de Bose-Einstein en un pozo de potencial armónico. La figura muestra imágenes sucesivas (una instantánea cada 10 milisegundos) de la evolución de la nube condensada.

8. CONFIGURACION DE SUMIDERO unidimensional con dos horizontes de agujero negro y una "singularidad" en el centro, donde los átomos se desacoplan del condensado mediante un láser. Las flechas y su tamaño indican la velocidad del flujo del condensado.



información (en forma de correlaciones) sobre cómo la presencia de ciertos patrones concretos para unas partículas tendría asociada la presencia de otros patrones concretos para las restantes partículas.

Cuando las partículas que componen el sistema son bosones idénticos, se puede presentar una situación muy especial e interesante: existen estados a los que es posible asignar unos patrones de intensidad y velocidades específicos e idénticos para todos y cada uno de los bosones. Un condensado de Bose-Einstein no es más que un conjunto de bosones idénticos en uno de tales estados. En este caso, podemos describir el sistema cuántico mediante una única función de onda. La nube ahora representa a todos los bosones de forma unificada; es como si desde un punto de vista clásico todos los bosones se hubieran colocado en un mismo punto y se movieran al unísono. Ese comportamiento coordinado de todos los bosones a la vez es a lo que llamábamos comportamiento coherente.

Imaginemos ahora que colocamos un conjunto de bosones en una trampa de potencial y que dejamos enfriar el sistema inhibiendo la entrada de cualquier flujo de energía desde el exterior. El estado cuántico de mínima energía y, por tanto, el preferido por el sistema, corresponde a una situación de condensación, en la que casi todos los bosones se caracterizan por unos mismos patrones de intensidad y velocidad. A medida que se enfría el sistema, un número creciente de bosones pasan a formar parte del estado condensado de mínima energía, mientras otros todavía tienen suficiente energía para comportarse de manera individual. Desde un punto de vista clásico, una parte de los bosones han ido a ocupar una misma posición en el fondo del potencial, mientras el resto sigue moviéndose de un lado para otro. Podemos asimilar esas dos poblaciones a sendas nubes superpuestas de distinta naturaleza: una nube cuántica asociada a los bosones condensados (muy concentrada) y una nube térmica asociada a los restantes bosones (más diluida). La nube asociada al condensado aparece exclusivamente como consecuencia del difuminado cuántico de lo que, en un contexto clásico, entenderíamos como un punto. La nube térmica corresponde tanto al movimiento estadístico de un conjunto de partículas, un gas propiamente dicho, como a su naturaleza cuántica.

En julio de 1995, la portada del número 269 de la revista *Science* reproducía la primera observación directa de un condensado de Bose-Einstein (*véase la figura 6*). Se habían colocado diez mil átomos de rubidio en una trampa de potencial de unos cientos de micras de diámetro. Aunque minúsculos desde nuestra perspectiva, los átomos se encuentran muy diluidos en el seno del potencial y, por tanto, interaccionan entre ellos muy ligeramente. Allí, se habían enfriado siguiendo varios procedimientos hasta llegar a una temperatura inferior a 90 milmillonésimas de grado Kelvin. La imagen muestra claramente cómo al alcanzarse la temperatura de transición se comienzan a distinguir las dos nubes; la central, mucho más concentrada, corresponde al condensado. A medida que baja la temperatura, la nube condensada se hace más prominente. Así, a temperatura cero llegaría a ser prácticamente la única presente.

Agujeros negros en condensados de Bose-Einstein

Como acabamos de explicar, podemos imaginar un condensado de Bose-Einstein como una pequeña nube de fluido a bajísima temperatura, siempre que no perdamos de vista la naturaleza cuántica de este fluido. Esta nube de fluido se halla confinada en cierta región, el pozo de potencial, gracias a unos campos electromagnéticos externos producidos mediante láseres (*véase la figura 7*). La forma de estos campos puede ser modulada a conveniencia; podemos, pues, determinar la configuración del condensado y su dinámica: la densidad del fluido (lo que llamábamos patrón de intensidad) y la velocidad con la que fluye en cada punto y en cada instante de tiempo.

Aparte de la interacción del condensado con el potencial externo, la configuración de la nube y su dinámica dependen también de las ligeras interacciones que se producen entre los diferentes átomos del condensado. Si las interacciones son repulsivas, como sucede en la mayoría de los condensados estudiados, proporcionan una presión interna, una resistencia a ser comprimido. Una vez que tenemos el condensado en una cierta configuración, lo agitamos suavemente durante un instante en una zona concreta. ¿Qué ocurre? En virtud de las interacciones mencionadas, la agitación se transmitirá por el interior del fluido a una velocidad finita (vista desde

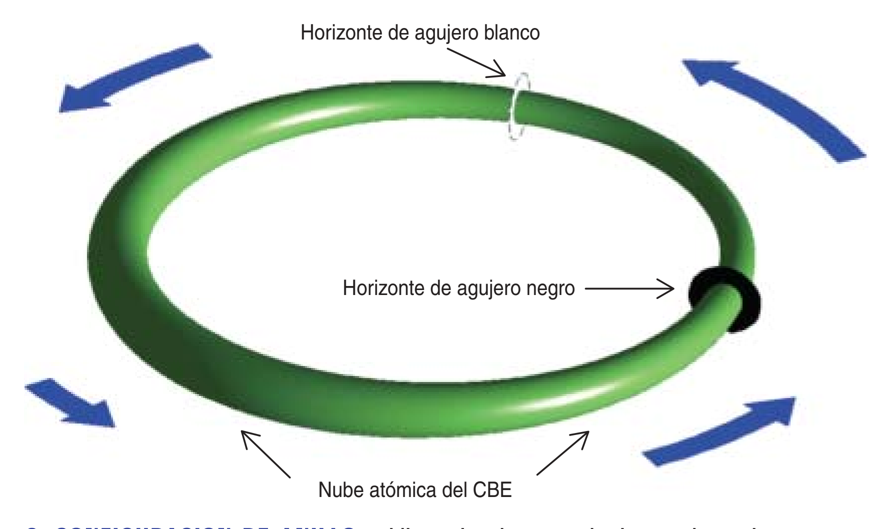
L. J. GARAY, J. ANGLIN, J. I. CIRAC Y P. ZOLLER

un observador en reposo con respecto al fluido), que depende de la intensidad de las interacciones y de la densidad del fluido en cada punto. Esta es la velocidad del sonido en un condensado: podemos imaginar la agitación anterior como la que se produciría si colocáramos altavoces en miniatura en el interior del gas (*véase la figura 2*).

Resumiendo, hemos llevado la discusión hasta un estadio en el que se pone de manifiesto que un condensado de Bose-Einstein se comporta como un fluido compresible. Por lo tanto, basándonos en los argumentos sobre analogías acústicas esgrimidos, debería ser posible manipular un condensado de tal forma que nos proporcionase un modelo análogo de agujero negro. Pero, ¿cuál sería la temperatura de Hawking del horizonte acústico en el condensado? Un cálculo aproximado basado en las características de los condensados que se manejan hoy en día en los laboratorios nos da una temperatura de tan sólo 10 milmillonésimas de grado Kelvin. Lo fantástico de este caso es que sabemos que la temperatura a la que está el condensado mismo es de unas 100 milmillonésimas de grado Kelvin; luego, en principio, podría ser discernible experimentalmente.

Aunque sea de un modo sumario, vale la pena detallar tres propuestas específicas que podrían tomarse como base realista para la realización práctica de análogos de agujeros negros en condensados de Bose-Einstein. La técnica necesaria para llevar a cabo estos experimentos podría estar disponible en un futuro muy cercano (quizás, en 5 o 10 años).

Sin embargo, antes de seguir adelante, importa subrayar una vez más las precauciones que hay que tener en el manejo de las analogías. Por ejemplo, en un condensado, la existencia de una geometría efectiva sólo afecta a las ondas de sonido, puesto que son el único tipo de perturbaciones que se propagan en estos sistemas, mientras que, en relatividad general, la geometría espacio-temporal determina el movimiento no sólo de los fotones, sino de todo tipo de energía. Por otro lado, esta visión geométrica de la propagación del sonido en condensados de Bose-Einstein no es válida para ondas cuya frecuencia sea mayor que una frecuencia de corte (normalmente muy alta). Estas ondas pueden viajar a velocidades mucho mayores que la velocidad del sonido y, por tanto, podrían remontar la corriente, incluso en un fluido supersónico; es decir, no verían el horizonte de sucesos del agujero acústico. Hay razones para creer que algo similar pudiera ocurrir con la visión geométrica del propio espacio-tiempo cuando a ésta se le añaden rasgos cuánticos (importantes para altas frecuencias). La ruptura de la visión geométrica en los condensados de Bose-Einstein más que una dificultad resulta una inspiración; podría ayudarnos a entender fenómenos cuánticos gravitatorios para los que no disponemos de una teoría satisfactoria.



9. CONFIGURACION DE ANILLO unidimensional con un horizonte de agujero negro y otro de agujero blanco y sin "singularidad'': el condensado (CBE) fluye en un circuito circular cerrado. Las flechas y su tamaño indican la velocidad del flujo del condensado.

L. J. GARAY, J. ANGLIN, J. I. CIRAC Y P. ZOLLER

El sumidero

A la hora de ponerse a diseñar experimentos concretos en los que un condensado sirva como modelo análogo de un agujero negro, nos enfrentamos con dificultades añadidas de tipo práctico. La superación de las mismas requiere los esfuerzos conjuntos de físicos experimentales y teóricos de varias disciplinas (física del frío, óptica cuántica, materia condensada, relatividad general). Lo que sigue debe entenderse como los primeros pasos hacia el diseño de un experimento concreto realizable, a la vez que muestra el tipo de dificultades a las que habrá que enfrentarse.

El primer tipo de configuración que nos viene a la mente cuando pensamos en simular un agujero negro es el modelo de desagüe tridimensional o sumidero, en el que un flujo de átomos condensados cae, cada vez más deprisa, radialmente y desde todas las direcciones, hacia un mismo punto del espacio. Se requiere, pues, un mecanismo que continuamente saque los átomos que se van acumulando en el centro de la configuración. Una configuración propuesta por uno de los autores y sus colaboradores es la versión unidimensional de este sistema (*figura 8*). En este caso, tenemos un flujo cuasilineal para el fluido: el fluido entra por los dos extremos de un tubo construido mediante campos electromagnéticos adecuados; se va acelerando hasta que, a una distancia determinada del centro del tubo, el flujo se hace supersónico. Desde allí, el fluido continúa su viaje hacia el centro del tubo, donde es extraído del condensado. En este caso existe un procedimiento mediante el cual se podrían retirar los átomos del centro del tubo: un láser de desacoplo. Un haz láser de suficiente potencia enfocado de forma perpendicular al tubo sacaría los átomos que fueran llegando al centro.

Sin embargo, el establecimiento de unas restricciones externas al flujo del condensado nos lleva a afrontar un nuevo problema. Cuando

un condensado fluye cerca de una pared a velocidades cercanas a las del sonido, cualquier rugosidad en ésta puede provocar la formación de vórtices en el condensado, con la consiguiente alteración del flujo. La reducción del grosor del tubo hasta tamaños cercanos a cierta longitud de corte, relacionada con la frecuencia de corte mencionada anteriormente, resuelve este problema, ya que, en esas circunstancias, no queda espacio para que dichas alteraciones evolucionen.

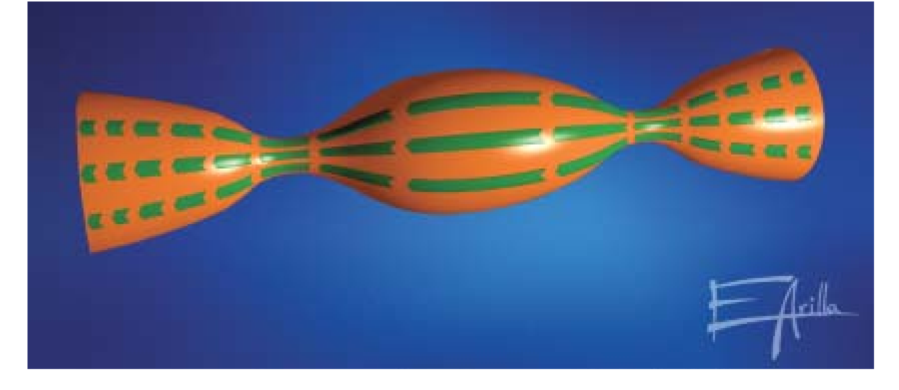
Este modelo se encuentra con una dificultad importante: mantener estacionario un flujo apreciable de fluido (al menos durante el tiempo suficiente) requiere una reserva de fluido notable y no parece fácil alimentar el condensado manteniendo la estacionariedad y sin complicar muchísimo el diseño experimental.

Parece, por tanto, que tenemos que pensar en otro tipo de configuraciones. Una configuración, también propuesta por uno de los autores, que consigue solventar este problema es la siguiente.

El anillo

Imaginemos ahora que los extremos del tubo de la configuración anterior se juntan y forman un anillo. Por su interior el condensado fluye en sentido antihorario; lo hace de manera tal, que su velocidad es subsónica en una zona, acelera hasta llegar a alcanzar la velocidad del sonido en un cierto punto, es supersónica en otra zona y frena hasta convertirse en subsónica otra vez a partir de otro cierto punto, para llegar al punto de partida. La configuración completa es un condensado de Bose-Einstein que gira en el interior de un anillo con una zona de flujo subsónico y otra de flujo supersónico (*véase la figura 9*).

El punto en el que el flujo se hace supersónico representaría un agujero negro (silencioso) y el punto en el que se vuelve a convertir en subsónico correspondería a un agujero blanco, para un observador situado en la zona subsónica. Esta propuesta no necesita la extracción de átomos del condensado ni la consiguiente alimentación del mismo, puesto que éste fluye de forma continua.



10. CONFIGURACION DE EMBUDO DE LAVAL con un horizonte de agujero negro y otro de agujero blanco situados en los estrangulamientos de la derecha y de la izquierda, respectivamente, y sin "singularidad". Las flechas y su tamaño indican la velocidad del flujo del condensado.

E. ARILLA

Para llegar a tal configuración anular, primero tendríamos que disponer de un condensado que fluyera uniformemente en una trampa electromagnética con la forma de anillo descrita. Luego, comenzaríamos a introducir modificaciones en estos campos, de forma que produjeran una aceleración o una desaceleración en las zonas deseadas hasta conseguir una configuración hidrodinámicamente estable con horizontes acústicos. Los análisis muestran que, durante este proceso, es necesario pasar transitoriamente por configuraciones no sólo estables sino también por otras inestables. Sin embargo, las simulaciones numéricas indican que es posible pasar por los regímenes de inestabilidad sin destruir el flujo, puesto que las inestabilidades son pequeñas y operan durante intervalos de tiempo suficientemente cortos.

El embudo de Laval

La experiencia acumulada por los diseñadores de túneles de viento supersónicos a la hora de proporcionar flujos hidrodinámicamente estables ha sugerido a uno de los autores y a sus colaboradores proponer como configuración realista una adaptación de la forma de los túneles de viento para condensados de Bose-Einstein.

Consideremos de nuevo un tubo cuasiunidimensional en el que el condensado se introduce por un extremo a una velocidad subsónica. La idea básica es que, para flujos subsónicos, un estrechamiento del tubo produce una aceleración del flujo y viceversa. Sin embargo, desafiando a la intuición, la situación se invierte cuando se tiene un flujo supersónico: un estrechamiento del tubo produce desaceleración y viceversa.

La configuración completa se ilustra en la figura 10. La sección transversal del tubo comienza a estrecharse de suerte que el fluido se va acelerando. Así llegamos hasta un cuello de botella en el que el fluido alcanza la velocidad del sonido (el horizonte de agujero negro). El ensanchamiento posterior del tubo continúa acelerando el flujo, a la espera de que un estrechamiento comience a desacelerarlo. Entonces se llega a otro cuello de botella (el horizonte de agujero blanco), en el que el flujo vuelve a ser subsónico. La forma completa del tubo recibe el nombre de embudo de Laval, por su inventor, el ingeniero sueco Carl Gustaf Patrick de Laval.

Esta configuración puede verse como complementaria al anillo que hemos descrito; proporciona una forma específica de producir el tipo de perfiles de velocidad buscados. Podemos imaginar un tubo anular de sección uniforme, con un condensado girando a velocidad constante y subsónica en su interior. Estrechando la sección del tubo en dos zonas concretas, podríamos conseguir la creación de un horizonte acústico. Quizás entonces nos hallásemos en disposición de observar por primera vez una radiación de fonones análoga a la radiación de un agujero negro predicha por Hawking.

Temperatura de Hawking

Gracias al gran desarrollo técnico en materia de condensados de Bose-Einstein que ha habido en los últimos años, éstos se han convertido en sistemas que se manipulan con facilidad y de maneras muy

sutiles en el laboratorio. Cabe esperar que, en un futuro cercano, podamos obtener configuraciones supersónicas en estos condensados. Las configuraciones explicadas presentan inestabilidades que, en las condiciones adecuadas, son suficientemente pequeñas como para no afectar al condensado durante un tiempo demasiado largo. Las inestabilidades aparecen en la forma de creación de pares de partículas y antipartículas cerca del horizonte del agujero negro acústico, de manera similar a lo que ocurre con la radiación de Hawking (*véase la figura 3*). Por otra parte, la temperatura de Hawking esperada en este tipo de sistemas, 10 milmillonésimas de grado Kelvin, es comparable con la temperatura del condensado en sí mismo, menor de 100 milmillonésimas de grado Kelvin. Por tanto, el efecto podría ser observable.

La temperatura de Hawking es directamente proporcional a la velocidad del sonido en el condensado. Las velocidades típicas que se encuentran en los laboratorios son del orden de unos pocos milímetros por segundo. Esta velocidad depende, a su vez, de la fuerza con la que los diferentes átomos del condensado se repelen entre sí. Para entender la forma en que dos átomos interaccionan cuando pasan uno cerca del otro, podemos visualizar a un átomo como un minúsculo pozo de potencial y al otro como un punto difuminado (o nube) que incide sobre él. Dependiendo de la profundidad y anchura del pozo de potencial que describe el átomo, la trayectoria de la nube se desviará de forma diferente al cruzar la zona de influencia del pozo de potencial. Desviación que puede ser de tipo atractivo o repulsivo. Si pudiéramos cambiar la naturaleza del átomo en sí de tal forma que la anchura del pozo de potencial se mantuviera fija pero su profundidad cambiara, podríamos modificar la interacción entre los dos átomos a nuestra conveniencia. Existirían entonces unas profundidades concretas, que podríamos llamar singulares, en las que la interacción pasaría de ser repulsiva a ser atractiva. Al acercarnos a una de ellas, aumentando la profundidad del pozo de potencial, una interacción repulsiva se haría arbitrariamente intensa (teóricamente sin límite) hasta que, al cruzar la profundidad singular, la interacción cambiaría de signo para tornarse atractiva.

Lo que acabamos de explicar se puede llevar a cabo en la práctica colocando los átomos constituyentes del condensado en un estado interno manipulable con un campo magnético externo. Cuando el campo magnético se acerca a unos valores concretos, las llamadas resonancias de Feshbach (las profundidades singulares anteriores), el estado interno y, por tanto, la naturaleza de los átomos se modifican: se puede aumentar, mucho y de forma controlada, la fuerza de repulsión entre ellos. Distintos estudios experimentales sugieren que, por esa vía, no es difícil multiplicar por diez la velocidad del sonido en un condensado, hasta los 6 centímetros por segundo. Así, la temperatura de Hawking podría llegar hasta las 100 milmillonésimas de grado Kelvin. No hay que olvidar, sin embargo, que una mayor velocidad del sonido también haría más dificultosa la consecución de flujos supersónicos.

Este es el estado de la cuestión en la actualidad. Como vemos, la interdependencia entre técnica y ciencia básica, tanto teórica como experimental, nunca deja de asombrarnos. Las sorprendentes propiedades de los bosones postuladas por Bose y Einstein en 1924 han dado lugar en nuestros días a un desarrollo experimental y técnico que puede ayudarnos a entender el comportamiento de los agujeros negros, la predicción quizá más importante de la teoría de la gravitación de Einstein. Una vez más, bajar a la Tierra puede ayudarnos a comprender los cielos.

Bibliografía complementaria

LA MECÁNICA CUÁNTICA DE LOS AGUJEROS NEGROS. Stephen W. Hawking, en *Investigación y Ciencia*, n.º 6, págs. 22-29, marzo de 1977.

AGUJEROS NEGROS Y TIEMPO CURVO. Kip S. Thorne. Ed. Crítica, 1995.

EL CONDENSADO DE BOSE-EINSTEIN. Eric A. Cornell y Carl A. Wieman, en *Investigación y Ciencia*, n.º 260, páginas 6-12, mayo de 1998.

Borrado cuántico

En mecánica cuántica cada historia tiene dos caras, pero sólo se puede ver una de ellas a la vez. Los experimentos muestran que, al "borrar" una, aparece la otra

Stephen P. Walborn, Marcelo O. Terra Cunha, Sebastião Pádua y Carlos H. Monken

En 1801, Thomas Young, erudito caballero inglés, realizó uno de los experimentos más célebres de la historia de la física. He aquí cómo lo describió, dos años más tarde, en una conferencia ante la Regia Sociedad de Londres:

Hice un pequeño agujero en una contraventana y lo cubrí con un grueso trozo de papel que perforé con una aguja fina... Interpuse en el rayo de luz una tira de cartón de aproximadamente la decimotercera parte de una pulgada, y observé su sombra tanto en la pared como en otros cartones colocados a diferentes distancias.

Young no vio sobre la pared opuesta, como podría suponerse, una sombra delgada, sino toda una hilera de rayas o *franjas* equiespaciadas, claras y oscuras, con la banda central siempre brillante. Cuando bloqueaba la luz a un lado de la tira de cartón, las franjas desaparecían. Llegó a la conclusión de que hacía falta la luz procedente de ambos lados para obtener el patrón. Pero, ¿cómo podían combinarse dos rayos de luz para crear una franja oscura? ¿Por qué se encendía siempre el centro de la sombra y nunca quedaba oscuro? Si la luz se componía de partículas que viajaban siempre por rayos rectos, idea compartida por muchos, incluido Isaac Newton, no era fácil encontrarle una explicación.

Con su "tira de cartón", Young puso en marcha una revolución de la física cuyos ecos todavía se sienten hoy. En la actualidad, el suyo es un experimento básico en los laboratorios de los estudiantes de primer curso de física, aunque ahora se suele llevar a cabo perforando dos rendijas en un fragmento de opaco microfilm. (De ahí el nombre: "Experimento de la doble rendija de Young"). Puede llevarse a cabo fácilmente una demostración del fenómeno que observó, la *interferencia*, con olas en un depósito de agua. Por analogía, el experimento de Young parecía venir a demostrar que la luz se compone de ondas, como había defendido Christiaan Huygens. Pero la historia no acabó ahí.

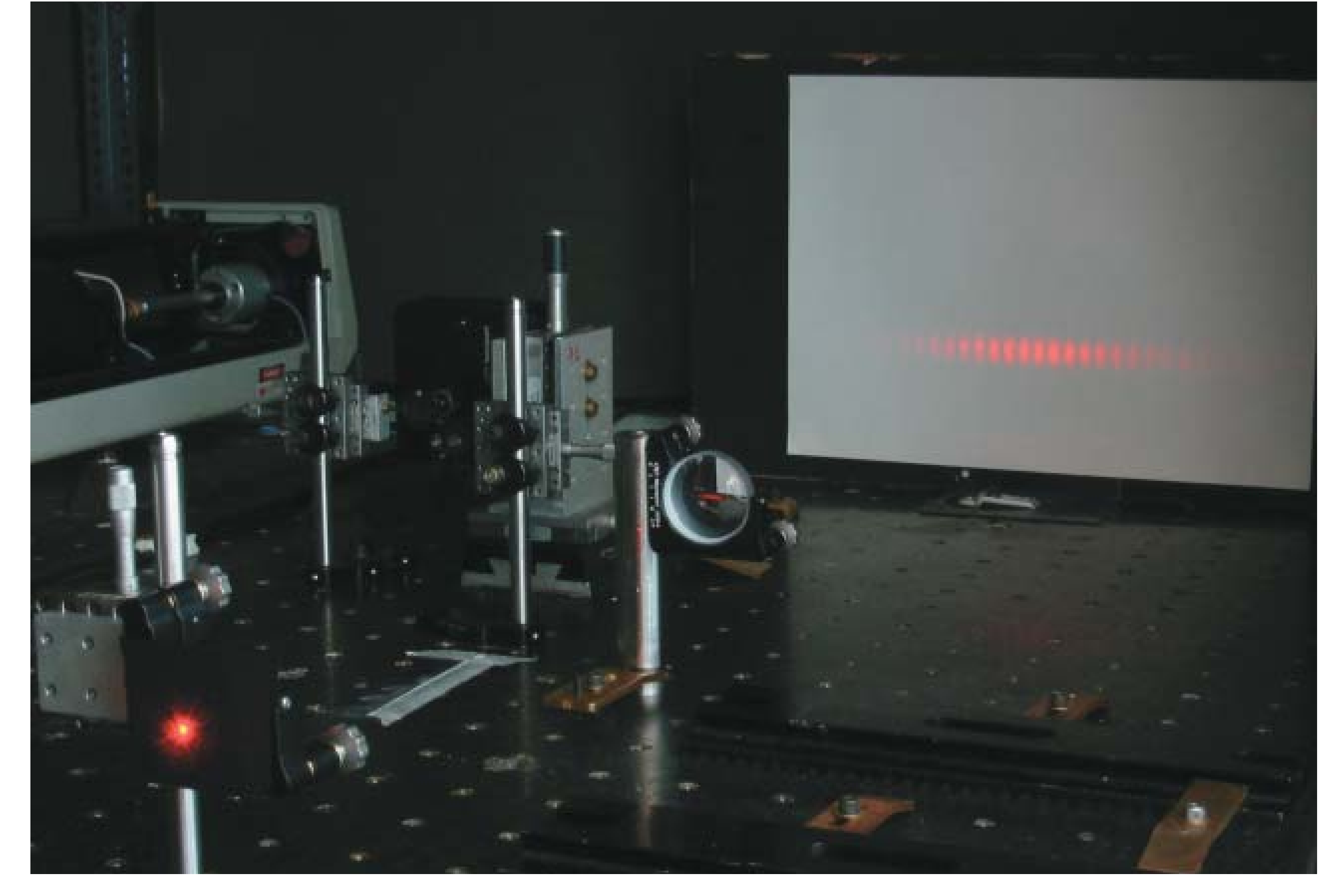
A principios del siglo XX, se descubrió que la luz sí se comporta, en algunos aspectos, como si estuviera compuesta de partículas. En concreto, existe una "cantidad mínima", un "cuanto", de luz, el fotón. En 1909, Geoffrey Taylor repitió un experimento similar al de Young; demostró que los fotones individuales sufren otro fenómeno de interferencia, la *difracción*. Al atenuar la luz hasta que los fotones llegasen a la pantalla de uno en uno, eliminó cualquier posibilidad de que interfiriesen entre sí. Pero, tras apuntar los resultados de varios experimentos, Taylor se encontró con el mismo patrón de franjas de difracción. Daba la impresión de que un fotón podía "interferir consigo mismo".

Y no sólo los fotones. Otros objetos que parecían indiscutiblemente "corpusculares", como los electrones, los neutrones e incluso las moléculas del carbono 60, las buckybolas, mostrarían el mismo comportamiento ondulatorio. La autointerferencia de las partículas constituye el mayor misterio de la física cuántica; Richard Feynman, premio Nobel, lo llamó "el *único* misterio" de la teoría cuántica.

En tiempos recientes se ha comenzado a arrojar algo de luz sobre este misterio mediante la realización experimental de borradores cuánticos. Permiten optar por la aparición o desaparición de las franjas de interferencia. Mediante una versión más elaborada del experimento de Young, nuestro grupo ha construido un borrador cuántico y lo ha utilizado para poner en práctica, en principio, la noción de "elección retardada": la posibilidad de que quien lleva a cabo el experimento puede tomar la decisión correspondiente *después de que se haya detectado la partícula*. Un experimento de elección retardada evoca una suerte de alteración del pasado. Pero los borradores cuánticos no cambian la historia. Sí aclaran, en cambio, cómo surgen los fenómenos de interferencia en la física cuántica.

Tirar una moneda cuántica

Comprendemos bien por qué aparecen franjas de interferencia en el experimento clásico de la doble rendija. Según la teoría ondulatoria de la luz, cuando se encuen-



1. EN UNA VERSION MODERNA del experimento de la doble rendija de Thomas Young, un láser de helio-neón ilumina un fragmento de microfilm en el que hay perforadas dos rendijas con una separación de 0,1 milímetros. El rayo láser atraviesa una lente divergente (*en el centro*) que lo difumina, de manera que pueden verse con mayor claridad en la pantalla que hay detrás las franjas de interferencia producidas por las dos rendijas. En su experimento de 1801, Young empleó un equipo mucho más modesto: luz solar, un agujerito para hacer coherente la luz, un trozo de cartón para dividir el rayo y ninguna lente divergente. Aun así, distinguió al menos cinco bandas brillantes en la pared opuesta.

tran dos rayos de luz coherente con la misma longitud de onda, se combinan. Las situaciones más extremas son la interferencia constructiva, donde las ondas se refuerzan mutuamente, o la interferencia destructiva, en la que se anulan totalmente la una a la otra.

En el experimento de Young no tienen por qué medir lo mismo los caminos entre un punto de observación determinado y cada rendija. Cuando sí son iguales (es decir, cuando el punto de observación se encuentra en un punto equidistante de ambas aperturas), las ondas llegan en fase e interfieren de manera constructiva. Esto explica por qué Young siempre veía una banda de luz en el centro de la "sombra" de su tira de cartón. A ambos lados de esta banda central se encuentran las regiones donde una onda ha tenido que viajar una longitud de onda más que la otra. Ahí, las ondas interfieren de manera destructiva y aparece una banda oscura. Después viene una región en la que una onda viaja una longitud de onda más que la otra. Aquí vuelven a producirse una interferencia constructiva y una banda de luz.

Para entender por qué la interferencia cuántica constituye un fenómeno inesperado, podría ayudarnos la imagen de tirar una moneda al aire. Si la moneda no está trucada, la probabilidad de que salga cara es de un 50 %, y la de que salga cruz, otro 50 %. La probabilidad de que salga cara *o* cruz es la suma de ambas probabilidades:

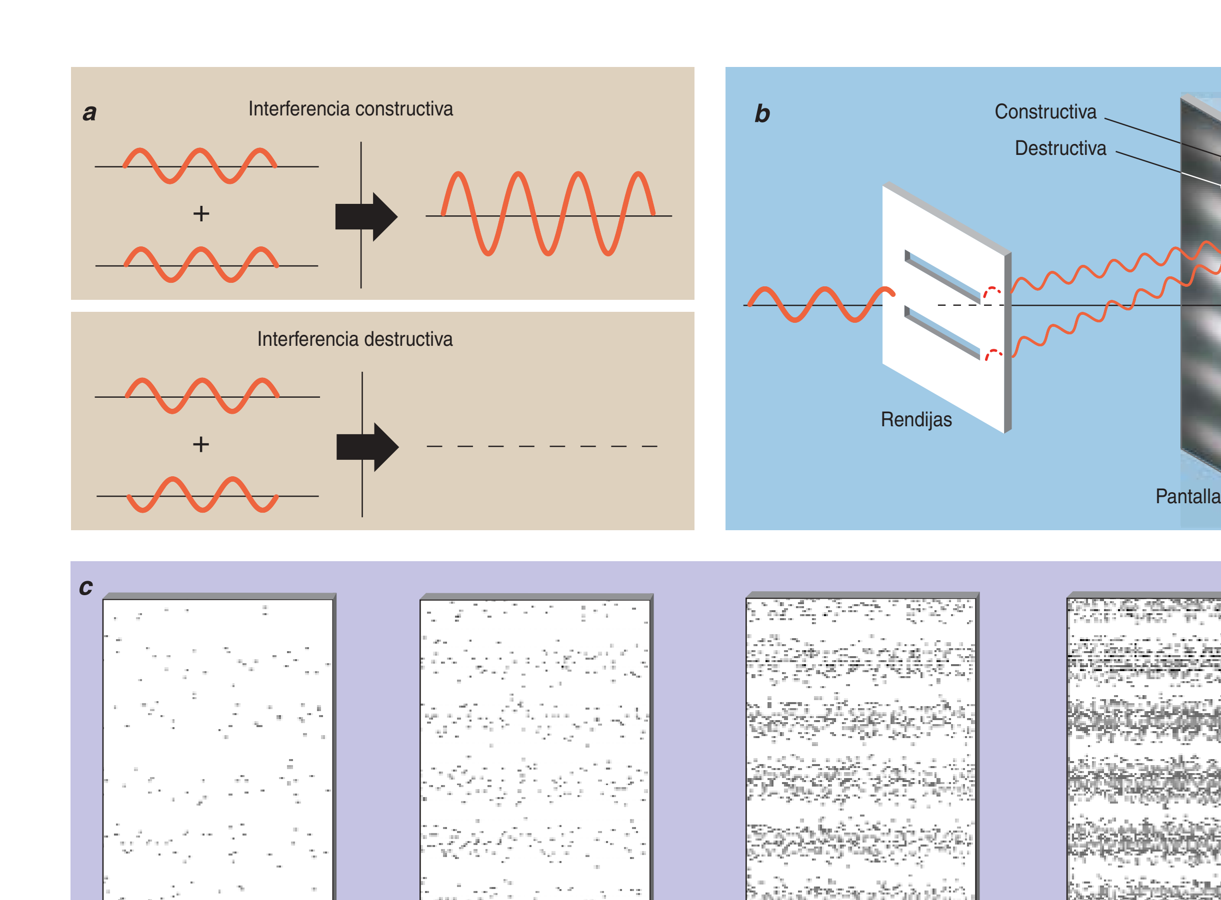
$$\text{Prob (cara o cruz)} = \text{Prob (cara)} + \text{Prob (cruz)} = 100\,\%$$

Consideremos ahora un "lanzamiento de moneda" basado en el experimento de Young. Enviemos un rayo de luz hacia la doble rendija e instalemos un fotodetector en el lado opuesto, a cierta distancia. Para que resulte más teatral la paradoja, situémoslo en una franja de interferencia oscura. Atenuemos la luz, de modo que los fotones pasen por las rendijas de uno en uno. Cubramos primero la rendija 2; nos encontraremos, por ejemplo, con que un 5 % de los fotones atravesará la rendija 1 y activarán el detector. Así pues, Prob (rendija 1) = 5 %. Cubramos a continuación la rendija; ahora un 5 % de los fotones atraviesan la rendija 2, activando el detector: Prob (rendija 2) = 5 %. Cuando destapásemos ambas rendijas, creando dos rutas posibles, esperaríamos encontrarnos con un 10 % de los fotones. ¡Pero no! Debido a que situamos el detector en una franja oscura, podríamos pasarnos horas llevando a cabo el experimento sin ver un solo fotón. Es decir,

$$\text{Prob (1 o 2)} = 0\,\% \neq \text{Prob (1)} + \text{Prob (2)}$$

La explicación que la física cuántica ha encontrado para este comportamiento es el principio de la *superposición*, según el cual los acontecimientos ondulatorios se combinan de acuerdo con una *amplitud*

S. P. WALBORN, M. O. TERRA, S. PADUA Y C. H. MONKEN



2. SE EXPLICA LA INTERFERENCIA DE YOUNG con la teoría ondulatoria de la luz. (*a*) Dos ondas de luz que se hallen en fase se reforzarán constructivamente entre sí: se creará un rayo de luz más brillante. Cuando no lo estén, se atenuarán destructivamente. (*b*) Una vez las ondas de luz han pasado por las dos rendijas, interfieren constructivamente dondequiera que una viaje un número entero (0, 1, 2,...) de longitudes de onda más lejos que la otra. Interferirán destructivamente cuando una onda viaje una fracción (1/2, 3/2, 5/2,...) de longitudes de onda más lejos. Según la geometría, se produce así una serie de rayas equiespaciadas claras y oscuras, o franjas de interferencia. (*c*) En las versiones modernas del experimento de Young resulta posible enviar los fotones de uno en uno a través de la rendija. Como muestra esta simulación por ordenador, el patrón de interferencia aparece a medida que aumenta el número de fotones. Aunque esos fotones no se interfieren mutuamente siguen produciendo franjas de interferencia. La única explicación parece ser que un fotón puede pasar de manera simultánea a través de ambas franjas e interferir consigo mismo.

de probabilidad; no se acomodan a una probabilidad. Matemáticamente hablando, una amplitud de probabilidad no es un número real positivo; se trata, por el contrario de un número complejo (es decir, un número como $0{,}1 + 0{,}2i$, donde i representa la raíz cuadrada de -1). Así pues, dos amplitudes de probabilidades no nulas (por ejemplo, $0{,}1 + 0{,}2i$ y $-0{,}1 - 0{,}2i$) pueden sumar cero, lo que nunca sucede con las probabilidades clásicas.

Desde el punto de vista metacientífico, el significado de las amplitudes de probabilidades sigue siendo un gran misterio. De todos modos, resulta evidente que una "moneda cuántica" no se comporta igual que una clásica. Gracias al principio de superposición, un fotón, nuestra "moneda cuántica", puede ofrecer una combinación de cara y cruz.

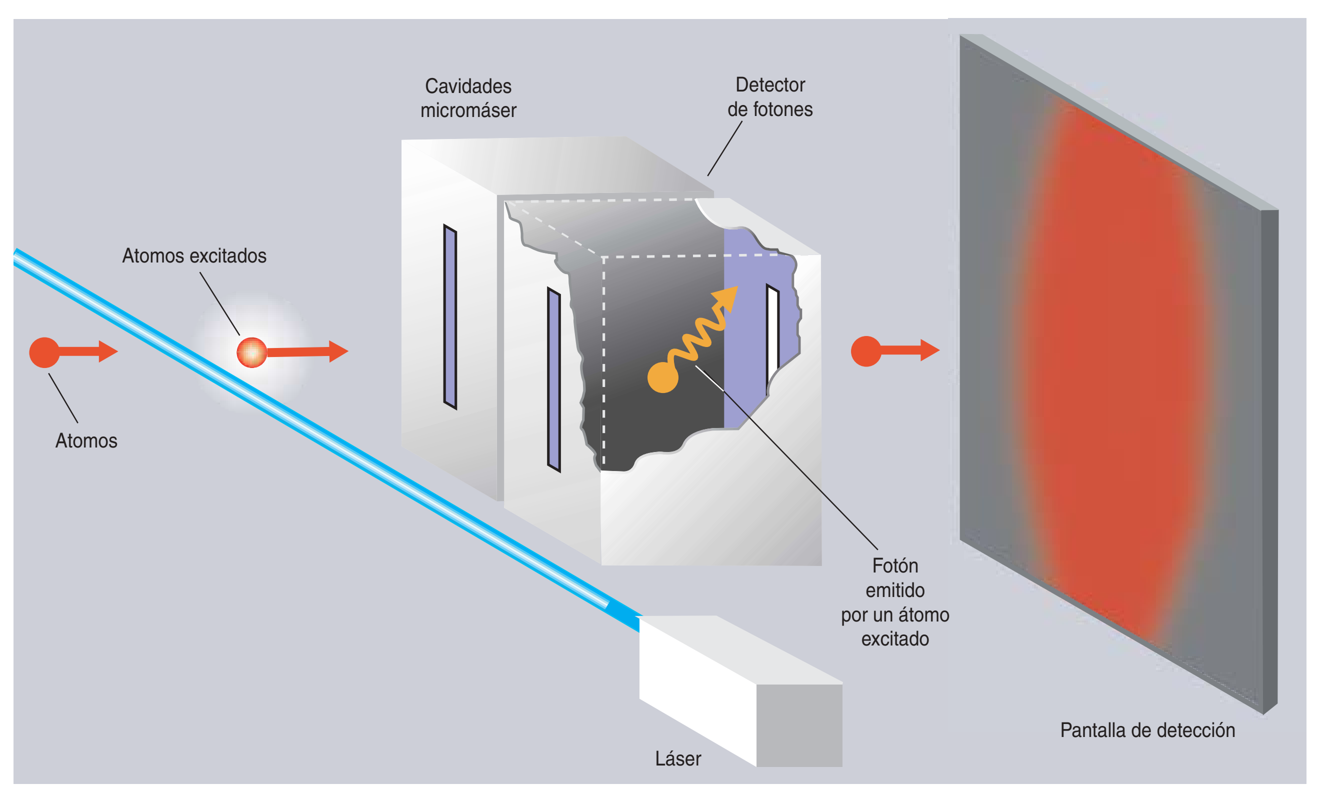
La materia ondula la materia

Si todo esto le parece bastante increíble, no será el único. Incluso los creadores de la física cuántica tuvieron dificultades con sus conceptos, y algunos nunca aceptaron las teorías a las que se vieron forzados a llegar. Max Planck, quien propuso en 1900 que la luz se comportaba como si estuviera compuesta de cuantos, lo consideraba un artificio matemático que concordaba por casualidad con los datos experimentales. A diferencia de Planck, Albert Einstein aceptaba la teoría de los cuantos de luz, pero albergó dudas acerca de la evolución posterior de la teoría cuántica. No podía admitir que lo que observamos y, en consecuencia, llamamos "realidad" fuera aleatorio. (La mecánica cuántica trata de po-

sibilidades y, por lo tanto, no dice nada acerca de *dónde* se encuentra el fotón; sólo dice dónde es *probable* o *improbable* que aparezca.) A Einstein tampoco le gustaba la inferencia de que esta realidad sólo existe en un estado único e inequívoco cuando la estamos observando. Así expresó su descontento ante Abraham Pais: "¿Acaso piensas que la Luna sólo existe cuando la miras?" Curiosamente, fue la insatisfacción de Einstein la que motivó y sigue motivando gran parte de la investigación moderna en física cuántica.

A finales de la década de 1920, Niels Bohr formuló la "interpretación de Copenhague" de la mecánica cuántica. Constituye el sistema teórico usual para eludir las paradojas de la física cuántica. En particular, el principio de la complementariedad afirma que, para un par de variables u "observables" (la posición o el momento lineal), el conocimiento preciso de una de ellas impide determinar con exactitud la otra. La posición es un observable "corpuscular": una partícula tiene una posición concreta en el espacio, pero una onda no. No resulta tan obvio que el momento lineal sea un observable ondulatorio. En 1927, Louis de Broglie propuso que, cuando una partícula, un electrón, adquiere momento lineal, adquiere también una longitud de onda característica. Según Bohr, todos los objetos cuánticos son *al mismo tiempo* onda y partícula; el comportamiento que observamos viene determinado por el tipo de medición que decidamos hacer. Si medimos una propiedad corpuscular, el objeto exhibirá un comportamiento corpuscular. Si después decidimos medir una propiedad ondulatoria, el objeto actuará como una onda. Pero no podemos hacer ambas cosas a la vez.

Einstein creía haber descubierto puntos débiles en la interpretación de Copenhague. Expresó una de esas críticas por medio de un "experimento mental": suspender una doble rendija de unos muelles muy sensibles de modo que pueda moverse hacia delante y hacia atrás. Cuando esas rendijas montadas sobre muelles dispersasen un fotón, la máquina sufriría un ligero retroceso. Anotando el retroceso junto con la posición en la que el fotón es detectado, el experimento descubriría la rendija por la que "pasó" el fotón (una medida de posición). Einstein sostenía que la medición del retroceso efectuada tras el paso del fotón no alteraría su trayectoria; todavía podrían seguir siendo observadas las franjas de interferencia. La longitud de onda (una propiedad ondulatoria) se deduciría de la separación de las franjas. ¡Así cabría conocer tanto el momento lineal como la trayectoria; por tanto, el principio de complementariedad sería un fraude!



3. EL EXPERIMENTO MENTAL del "borrador cuántico" de Scully, Englert y Walther elimina la interferencia (un producto ondulatorio) al guardar la información acerca de por qué rendija ha pasado un átomo excitado (una propiedad corpuscular). Con un láser se excita un átomo a un estado de alta energía. Luego, ese átomo atraviesa el aparato de doble rendija. Tras cada rendija hay una cavidad de microondas de una longitud suficiente para que el átomo salga de su estado de excitación antes de abandonarla. Se libera de esa manera un fotón que permite al experimentador detectar por qué rendija ha pasado el átomo. Según el principio de complementariedad de Bohr, no puede entonces comportarse como una onda. Por lo tanto, múltiples repeticiones del experimento producirán una mancha extensa en la pantalla de detección, en vez de franjas de interferencia. Pero al quitar la pared que separa a las cavidades se borraría la información del camino seguido y se restablecerá la interferencia.

Bohr demostró que el argumento de Einstein tenía un fallo. Invocó otro principio de la mecánica cuántica: el principio de incertidumbre de Heisenberg. Pese a que su nombre sugiere vaguedad, este principio proporciona información cuantitativa sobre la mejor precisión con que se pueden medir variables complementarias. Inevitablemente, el retroceso del aparato de la doble rendija altera el sistema y crea una incertidumbre en la posición del fotón en la pantalla de detección. Esta incertidumbre basta para difuminar las franjas de interferencia, de modo que ya no se podrá medir el momento lineal.

Durante muchos años se pensó que el cumplimiento de la complementariedad se debía al principio de Heisenberg. Se supone ahora que la complementariedad es más fundamental, que sería posible "marcar" la posición de una partícula sin alterar su momento lineal. Ello nos lleva a un nuevo tipo de experimentos: los borradores cuánticos.

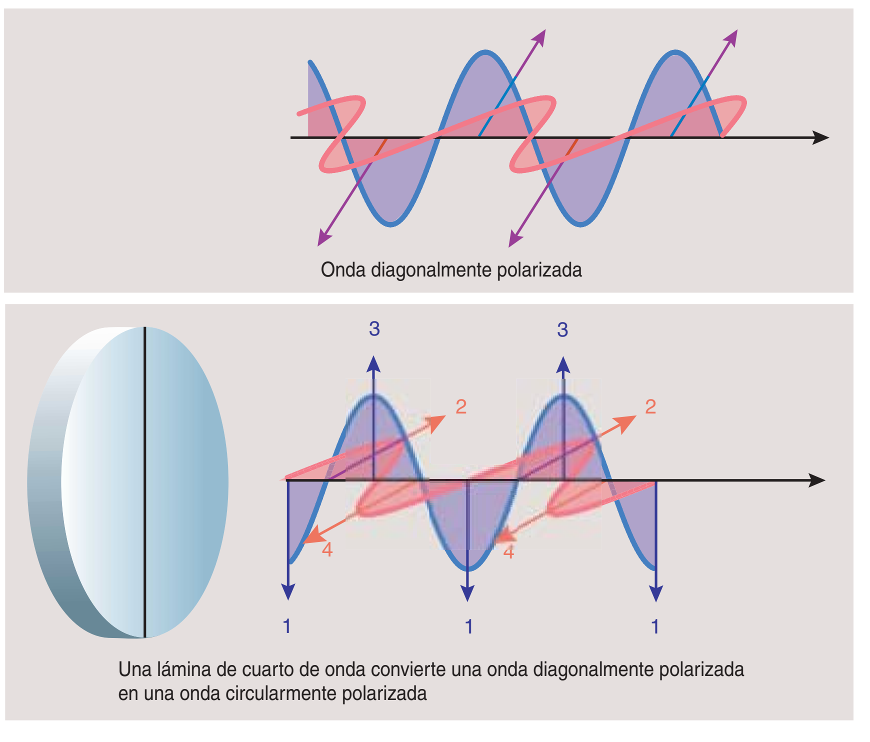
¿Qué camino?

Hace unos 20 años, Marlan O. Scully y Kai Drühl, causaron una conmoción con la idea del borrado cuántico. De acuerdo con su argumentación, si se puede obtener la información que indica la trayectoria de un objeto sin perturbar de manera significativa dicha trayectoria, la interferencia debería desaparecer (en virtud de la complementariedad); ahora bien, si después se procediese a "borrar" dicha información, la interferencia debería reaparecer. Podría incluso decirse que "la interferencia es igual a la ignorancia" (de la trayectoria de la partícula).

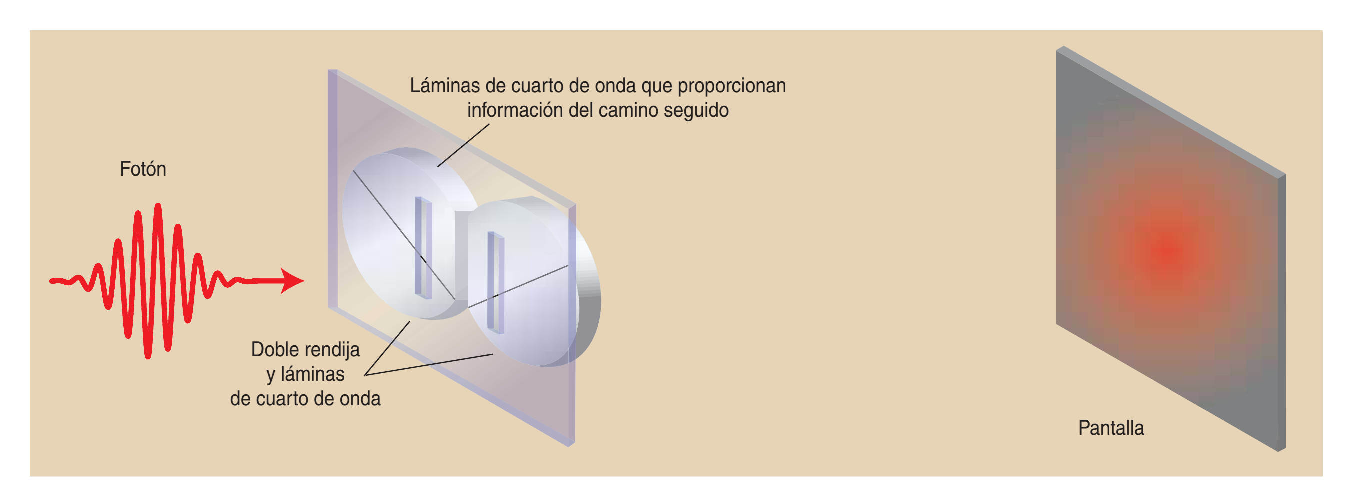
Posteriormente, Scully se unió a Berthold-Georg Englert y Herbert Walther en su propósito de llevar a cabo la idea. En su modelo, el objeto que interfiere es un átomo con electrones excitados a un nivel de energía muy alto. Tras cada una de las rendijas hay una cavidad de microondas diseñada para capturar un fotón emitido por el átomo cuando cae a un nivel de excitación inferior. Con sólo mirar en qué cavidad se encuentra el fotón, el experimentador sabrá por cuál de las rendijas pasó el átomo. La complementariedad supone que las franjas de interferencia tendrían que desaparecer. Pero si el experimentador quitase la pared que separa las cavidades, la información extra de por qué camino han pasado se borraría y las franjas reaparecerían inmediatamente.

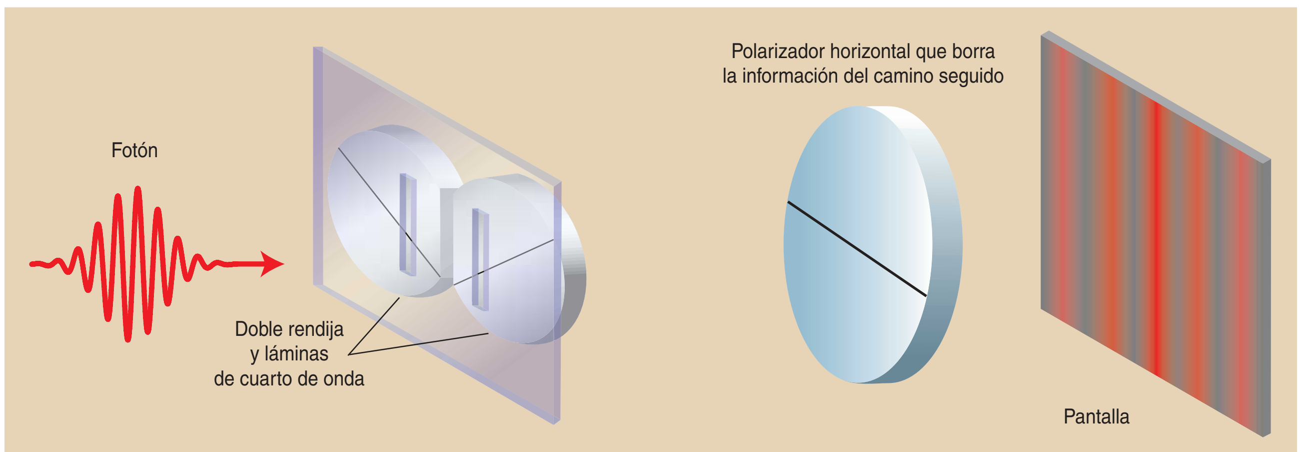
No se ha conseguido efectuar el experimento Scully-Englert-Walther, pero hemos realizado uno análogo con fotones, que facilitan mucho la tarea.

Nuestro experimento utiliza la polarización como marcador. La polarización de una onda electromagnética, pensemos en una lumínica, viene determinada por las oscilaciones de los campos eléctricos y magnéticos de los que se compone (*véase la figura 4*). Estos campos oscilan siempre en un plano perpendicular al sentido de su propagación, pero pueden apuntar en distintas direcciones dentro de este plano: vertical, horizontal o en un cierto ángulo (45º o –45º, por ejemplo) con respecto a la horizontal. Pueden incluso rotar a medida que se propagan hacia delante, a la manera de un tornillo dextrógiro o levógiro. Se dice de estas ondas que están polarizadas circularmente a derechas o a izquierdas. Por medio de unos componentes ópticos, las *láminas de onda*, resulta posible cambiar la dirección de la polarización o transformar un rayo linealmente polarizado en uno circularmente polarizado. Otro com-



4. NUESTRA VERSION DEL BORRADO CUANTICO utiliza la polarización como marcador de la rendija por la que pasa un fotón. Una onda de luz con polarización lineal (*parte superior*) consiste en campos alternativamente eléctricos o magnéticos. Aquí sólo aparece el campo eléctrico. Dado que sus componentes verticales y horizontales son iguales, se dice que está polarizado de manera diagonal (*parte superior, flechas púrpura*). Una lámina de cuarto de onda, como las que usan los autores en sus experimentos, retrasa una de las componentes (*figura inferior*). Esto hace que el campo eléctrico neto rote a medida que se propaga por el espacio (*parte inferior, flechas 1, 2, 3, 4*). Como esta rotación va, para quien esté observando la onda que llega, en sentido antihorario, se denomina al resultado onda polarizada circularmente a izquierdas. De haber retrasado la otra componente, se hubiera creado una onda polarizada circularmente a derechas. Con su eje colocado verticalmente, la lámina de cuarto de onda convierte la luz diagonalmente polarizada en luz circularmente polarizada; con su eje a 45^{0}, convierte la luz verticalmente polarizada en luz circularmente polarizada.





5. EN LA VERSION DEL BORRADO CUANTICO de los autores se colocan tras las rendijas láminas de cuarto de onda, que convierten las polarizaciones de los fotones, respectivamente, en circular a izquierdas y circular a derechas. Esto proporciona al experimentador información de los caminos seguidos; las franjas de interferencia desaparecen (*parte superior*). Sin embargo, un polarizador horizontal (*parte inferior*) convierte cualquiera de las polarizaciones circulares en polarizaciones horizontales; resulta entonces imposible distinguir entre los fotones que atravesaron las rendijas superior e inferior. La información del camino seguido se ha borrado y las franjas de interferencia reaparecen, como los autores han demostrado en el laboratorio.

ponente óptico común es el *polarizador*, que sólo permite el paso de luz con una polarización determinada. Cuando un rayo circularmente polarizado atraviesa un polarizador horizontal, es despojado de la parte vertical de la onda; queda sólo un rayo horizontalmente polarizado con la mitad de la intensidad del original.

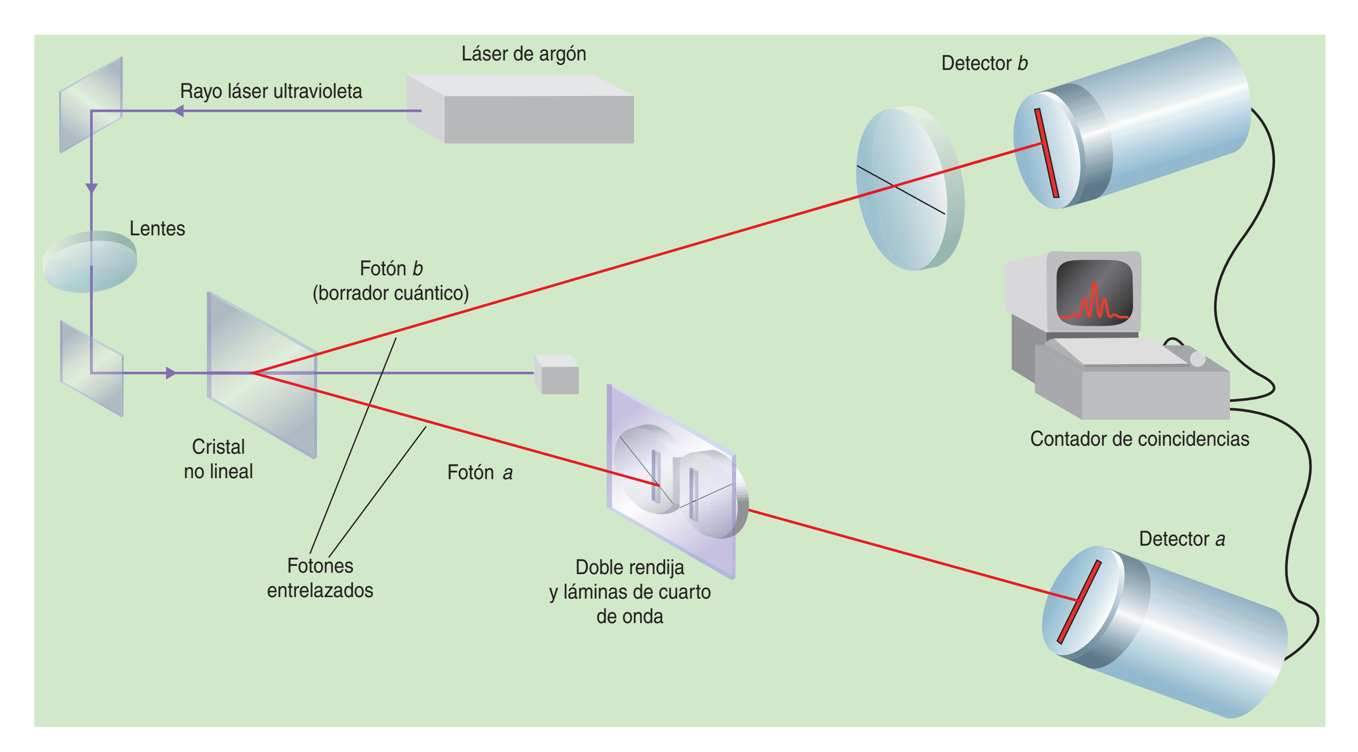
Repitamos ahora, en la imaginación, el experimento de Young con muchos fotones horizontalmente polarizados. Coloquemos tras las rendijas dos láminas de cuarto de onda: una que convierta los fotones horizontalmente polarizados en fotones circularmente polarizados a derechas, y otra que los polarice circularmente a izquierdas. Nos encontraremos con una gran sorpresa: las franjas de interferencia desaparecerán, sustituidas por una sola franja de luz, más intensa en el centro. Si dibujamos la distribución de los fotones en un gráfico, obtendremos una curva en forma de campana.

¿Qué ha pasado con la interferencia? Los fotones parecerán haber dejado de comportarse como monedas cuánticas; se habrán convertido en monedas clásicas. Las láminas de onda habrán correlacionado cada rendija con una polarización determinada. Mediante un polarizador circular podríamos medir la polarización y descubrir por qué rendija pasó cada fotón. Obsérvese que, para destruir el patrón de la interferencia, no hemos de medir la polarización. Basta con que *esté disponible* la información del camino seguido; hacer caso omiso no restablecerá la interferencia.

Una historia entrelazada

Para llevar a cabo el borrado cuántico se necesita algo más que un modo de indicar el camino que tomó el fotón; también hay que mostrar cómo se "borra" esa información. Para ello insertamos un polarizador lineal horizontal entre las láminas de cuarto de onda y el detector. Al repetir entonces el experimento dejamos de observar ya la curva con forma de campana; al detectar los fotones, se nos presenta un patrón de interferencia. Es como si nos pusiésemos unas gafas de sol y, de repente, viéramos lo que nos rodea a rayas.

¿Por qué restablece la interferencia un polarizador horizontal? Porque



6. EN EL EXPERIMENTO DE "ELECCION RETARDADA" se utiliza un segundo fotón como borrador cuántico. Se preparan los fotones *a* y *b* en un estado entrelazado para que cualquier medición de la polarización de *b* se entrelace con la información del camino seguido por el fotón *a*. La detección de coincidencias permite al experimentador determinar qué par de fotones están entrelazados uno con otro. Si los dos detectores se activan en el lapso de un nanosegundo, es casi seguro que los dos fotones constituyen un par entrelazado.

borra la información del camino seguido. Recordemos que nuestro polarizador horizontal filtra un fotón circularmente polarizado a derechas o a izquierdas y lo transforma en un fotón horizontalmente polarizado. No hay manera de distinguir en adelante si era lo uno o lo otro: una vez que un fotón pasa por el polarizador, no se puede determinar si procedía de la rendija 1 o de la 2. Eliminada la información corpuscular, los fotones quedan libres para volver a actuar como ondas.

Del mismo modo, si instalamos un polarizador lineal vertical entre las láminas de cuarto de onda y el detector, volveremos a borrar la información del camino seguido. Sin embargo, en este caso observamos un patrón de franjas, por lo común denominado de antifranjas, que no se halla exactamente en fase con el patrón que vimos con el polarizador horizontal. Las antifranjas presentan un mínimo central (*banda oscura*).

Disponemos, pues, de dos modos de dividir los resultados experimentales en subconjuntos. Mediante un polarizador circular separaríamos los fotones en dos grupos: los que pasaron por la rendija 1 (*circular a derechas)* y los que pasaron por la rendija 2 (*circular a izquierdas*). Con un polarizador lineal los separaríamos en dos grupos distintos: los que producen un patrón de franjas (*horizontales*) y los que producen un patrón de antifranjas (*vertical*). Esta es la esencia del borrado cuántico.

¿Dice algo el principio de incertidumbre acerca de este experimento? No. La polarización y la posición no son variables complementarias; lo mismo que ocurre en la propuesta de Scully-Englert-Walther, el principio de incertidumbre de Heisenberg no es, pues, aplicable aquí. ¿Por qué, entonces, se cumple el principio de complementariedad?

La respuesta es: el *entrelazado cuántico*. Cuando un fotón pasa por el aparato de la doble rendija, entra en una superposición de estados de posición: rendija 1 + rendija 2. Las láminas de cuarto de onda llevan a cabo una operación adicional de lógica condicional. Si el fotón pasa por la rendija 1, emergerá polarizado circularmente a derechas y, si lo hace por la rendija 2, emergerá polarizado circularmente a izquierdas. Así pues, la polarización se habrá *entrelazado* con el camino. El estado del fotón puede describirse como una nueva y más complicada superposición:

(rendija 1 Y polarizado a derechas) +
(rendija 2 Y polarizado a izquierdas)

Dado que ahora los dos observables están entrelazados, la manipulación de la información relativa a cualquiera de ellos cambiará de manera automática la información sobre la otra. Equivale por completo a describir el estado del fotón como:

(franjas Y horizontalmente polarizado) +
(antifranjas Y verticalmente polarizado)

Para volver a la analogía del lanzamiento de una moneda, los observables de posición y polarización vendrían a ser ahora como dos monedas "telepáticas". La moneda 1 cae de cara la mitad de las veces, igual que la moneda 2; por tanto, si se observa cada una de ellas de manera aislada, parecerá absolutamente normal. Su rareza cuántica sólo se manifestará cuando se descubra que cada vez que la moneda

1 cae de cara, la moneda 2 hace lo mismo.

Las monedas telepáticas le parecían bastante extrañas a Einstein. En un famoso artículo de 1935, escrito con Boris Podolsky y Nathan Rosen, sostenía que violaban el principio de complementariedad. Sin embargo, el entrelazado cuántico es un fenómeno muy real. Los físicos ensayan formas posibles de aplicar el entrelazado a ordenadores cuánticos y criptosistemas imposibles de descifrar.

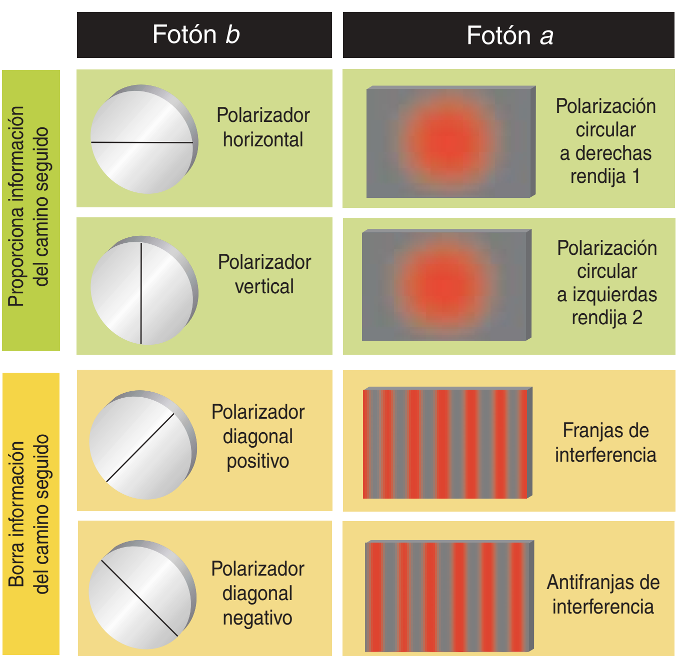
¿Cambiando la historia?

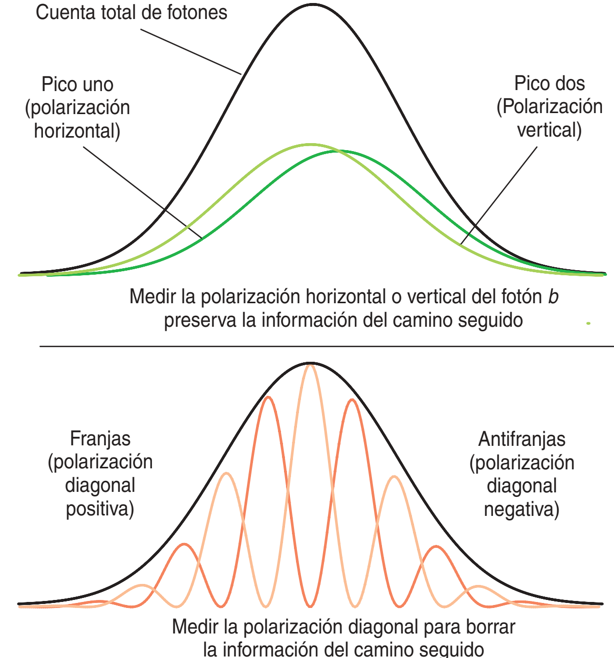
Nuestra última variante sobre el experimento de Young incorpora el entrelazado cuántico de manera mucho más manifiesta, para producir una situación de apariencia paradójica: la "decisión retardada", ideada por John A. Wheeler. Inquieta aún más que las monedas telepáticas, ya que parece abrir la posibilidad de modificar el pasado. Lo parece, pero no lo altera en absoluto.

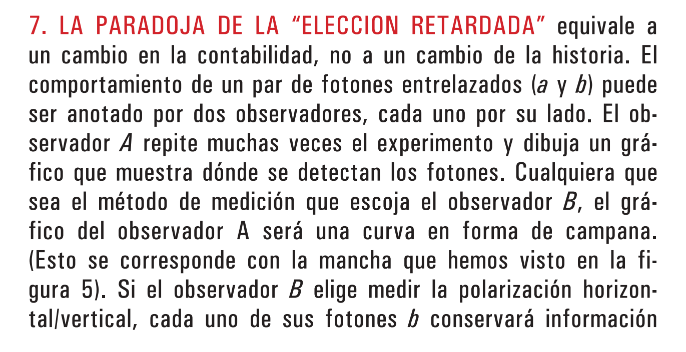
En el experimento de la decisión retardada creamos un par de fotones entrelazados, *a* y *b*. Cuando la posición de *a* tenga una polarización horizontal, *b* tendrá forzosamente una polarización vertical, y viceversa. (Llevamos esto a cabo mediante un proceso óptico no lineal, la "conversión paramétrica espontánea a la baja": se apunta un láser ultravioleta de argón hacia un cristal fino, que emite, así iluminado, dos fotones "gemelos".) Maniobramos el fotón *a* de modo que pase por la doble rendija y las láminas de cuarto de onda, y después por un detector, mientras que *b* se dirige directamente a un detector de polarización distinto. Esta vez, la polarización del fotón *b* será nuestro controlador del borrador cuántico.

Dado que *a* y *b* se hallan entrelazados, cualquier medición sobre *b* nos dirá algo sobre *a*. Podemos elegir si efectuamos una medición sobre *b* que nos proporcione información del camino seguido por *a*, o si efectuamos una medición que preserve la interferencia. Si medimos la polarización horizontal o vertical de *b*, preservaremos la información del camino seguido. (Es así porque la expresión "*a* circular a derechas y *b* horizontal" implica que el fotón *a* pasó por la rendija 1, mientras que "*a* circular a izquierdas y *b* horizontal" indica que pasó por la rendija 2). Para borrar la información del camino seguido por *a*, podemos medir, en cambio, la polarización diagonal de *b*. Una medición de la dirección diagonal positiva (45º) dará franjas de interferencia en la pantalla de detección de *a*; una medición de la dirección diagonal negativa (–45º) producirá antifranjas.

En nuestro laboratorio hemos demostrado que el borrado cuántico







7. LA PARADOJA DE LA "ELECCION RETARDADA" equivale a un cambio en la contabilidad, no a un cambio de la historia. El comportamiento de un par de fotones entrelazados (*a* y *b*) puede ser anotado por dos observadores, cada uno por su lado. El observador *A* repite muchas veces el experimento y dibuja un gráfico que muestra dónde se detectan los fotones. Cualquiera que sea el método de medición que escoja el observador *B*, el gráfico del observador A será una curva en forma de campana. (Esto se corresponde con la mancha que hemos visto en la figura 5). Si el observador *B* elige medir la polarización horizontal/vertical, cada uno de sus fotones *b* conservará información del camino seguido por sus gemelos entrelazados. Así, los fotones *a* medidos por *A* se separarán en dos grupos, uno de los cuales habrá pasado por la rendija 1 y otro que lo habrá hecho por la rendija 2. El recuento de los fotones de cada grupo producirá curvas en forma de campana, ligeramente desplazadas una de otra (*arriba derecha, líneas verdes*). Si el observador B decide medir la polarización diagonal, se borrará la información del camino seguido. En ese caso, los fotones entrelazados medidos por *A* se podrán separar en otros dos grupos, uno que forma franjas de interferencia y otro que forma antifranjas (*parte inferior*).

Los autores

STEPHEN P. WALBORN, MARCELO O. TERRA CUNHA, SEBASTIAO PADUA y CARLOS H. MONKEN investigan la óptica cuántica en la Universidad Federal de Minas Gerais (UFMG), en Belo Horizonte, Brasil. Stephen P. Malborn está a punto de terminar su tesis doctoral en óptica cuántica. Marcelo O. Terra Cunha es estudiante de doctorado de física y profesor ayudante de matemáticas. Sebastião Pádua y Carlos H. Monken son profesores adjuntos en la UFMG e investigadores principales del grupo experimental de óptica cuántica.

se produce sin que importe el orden en que se detecten *a* y *b*. Puesto que nuestro detector para el fotón *b* no está demasiado alejado (1,5 metros), el retraso en la detección es minúsculo: alrededor de 5 nanosegundos. En principio no hay ninguna razón por la que no podamos enviar *b* a una gran distancia, aunque sea a Marte. Esto daría al observador marciano varios minutos para decidir si nosotros, en la Tierra, observaremos franjas o no. Pero, ¿y si ya hemos recopilado nuestros datos y observado lo contrario?

Es imposible que esto ocurra. La medición retardada en Marte no cambia lo ocurrido en la Tierra; sólo cambia nuestra contabilidad. Para explicarlo recurramos al consabido diálogo entre Alicia y Bob. Supongamos que Alicia prepara en la Tierra un experimento de doble rendija con láminas de cuarto de onda. Su amigo Bob, que vive en Marte, le envía una caja de fotones. Alicia hace pasar cada fotón por el aparato de doble rendija, efectúa una medición de su posición y anota la medición: "Fotón 567 detectado en la posición $x = 4{,}3$". Ignora que, en Marte, Bob, se ha quedado con un gemelo entrelazado de cada uno de los fotones y mide su polarización como le apetece, bien en las direcciones horizontal y vertical, bien en las direcciones diagonales de 45º o –45º; los resultados los anota en su cuaderno de laboratorio: "Al fotón 567(B) se le ha detectado una polarización horizontal". Unas semanas más tarde, Bob visita a Alicia.

Alicia: Mira, he hecho ese experimento de la doble rendija y la lámina de cuarto de onda sobre el que escribieron esos físicos. Tal como decían, obtuve una aburrida curva en forma de campana sin la menor interferencia.

Bob (*un bromista*): ¿Estás segura? Revisa tus resultados y dibuja únicamente las posiciones de estos fotones. (*Entrega a Alicia una lista de los fotones en los que obtuvo una polarización de 45º*).

Alicia: ¡Franjas de interferencia! ¿Cómo has conseguido que los fotones interfieran después de haber anotado yo los resultados en mi cuaderno?

Bob: ¿Eso te parece genial? Echale un vistazo a esto. (*Le entrega a Alicia una lista de los fotones en los que obtuvo una polarización vertical.*)

Alicia: ¡No tienen franjas! Vuelve a darse la curva en forma de campana. (*Bob le entrega una lista de los fotones con una polarización de –45º y ella dibuja sus posiciones*). Reaparece la interferencia, pero esta vez con antifranjas. Esto es asombroso, Bob. Puedes controlar el pasado. ¿Puedes retroceder y cambiar las notas que saqué en mis exámenes, Bob?

Bob: Lo siento, Alicia, pero no hay nada mágico en ello. En realidad, los fotones que te envié estaban entrelazados con unos que me quedé. Realicé mediciones de polarización y de ahí salieron estas misteriosas listas de fotones. Pero mis mediciones no han modificado la historia. Se limitaron a exponerme cómo dividir tus resultados experimentales. Puedo dividirlos en franjas y antifranjas o en dos curvas en forma de campana. Pero no puedo cambiar el lugar donde acaba cada fotón.

Alicia: Qué pena. Me hacía *muchísima* falta ese sobresaliente en física. (*Se anima*). ¡Pero oye! ¡Tal vez podríamos convertir esto en un sistema para enviar mensajes!

Bob: Créeme, Alicia, ya hay alguien trabajando en ello.

Conclusión

El borrado cuántico parece confirmar que el principio de complementariedad es una parte fundamental de la teoría cuántica. Aunque los experimentos de este tipo han contribuido a ilustrar la naturaleza dual de los objetos cuánticos, los físicos todavía no son capaces de explicar *por qué* existe la dualidad onda-partícula. En esto seguiríamos estando de acuerdo con Richard Feynman, que en 1960 escribió: "Explicándoos cómo funciona, no podemos hacer que desaparezca el misterio. Vamos a explicaros cómo funciona, nada más".

Aun así, estamos progresando. Ahora comprendemos que el responsable de la complementariedad en el experimento de la doble rendija es el entrelazado cuántico, parte necesaria del acto mismo de la medición, y no la "incertidumbre cuántica" asociada a la medición. Parecerá una sutileza, pero gracias a ella muchos físicos se sentirán más tranquilos.

Bibliografía complementaria

THE FEYNMAN LECTURES ON PHYSICS. R. P. Feynman, R. B. Leighton y M. Sands. Addison-Wesley; Reading, Massachusetts, 1965.

QUANTUM THEORY AND MEASUREMENT. Dirigido por J. A. Wheeler y W. H. Zurek. Princeton University Press, New Jersey; 1983.

QUANTUM OPTICAL TESTS OF COMPLEMENTARITY. M. O. Scully, B.-G. Englert y H. Walther en *Nature*, vol. 351, págs. 111-116; 1991.

QUANTUM THEORY: CONCEPTS AND METHODS. A. Peres. Kluwer Academic Publishers; Dordrecht, 1995.

QUANTUM OPTICS. M. O. Scully y M. S. Zubairy. Cambridge University Press; Nueva York, 1997.

DOUBLE-SLIT QUANTUM ERASER. S. P. Walborn, M. O. Terra Cunha, S. Pádua y C. H. Monken en *Physical Review A*, vol. 65, pág. 033818; 2002.

Ulugh Beg

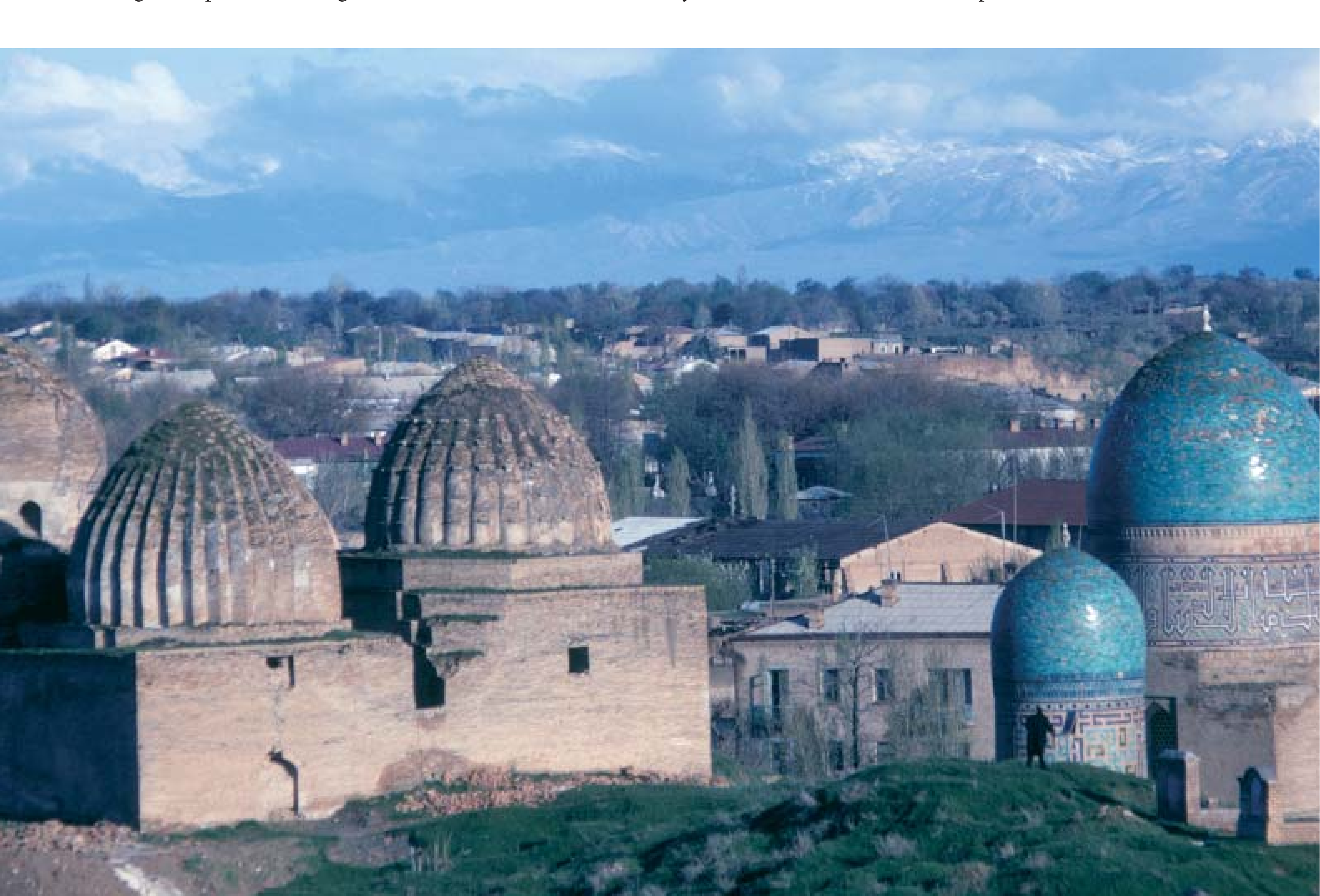
Uno de los astrónomos más famosos de Oriente en el siglo XV, este soberano hizo construir en Samarcanda un gran observatorio astronómico y realizó una competente investigación del firmamento

Bernhard Du Mont

Tamerlán, o Timur Lang (1337-1405), fue un caudillo de la respetada tribu mongola de Barlas, venida a menos. Residía ésta en Shahrisabs, al sur de Samarcanda. Por parte materna, Timur descendía de Gengis Jan. Por matrimonio obtuvo el título de Guragan (yerno del Jan), crédito indispensable para un caudillo sucesor del imperio de Gengis Jan.

Con habilidad política y una brutalidad despiadada, Timur persiguió su gran objetivo: reinstaurar el antiguo imperio de Gengis Jan. Hasta su muerte arrasó casi todos los estados islámicos de Asia y los despobló. Se adueñó así de un territorio que abarcaba desde los Urales hasta Siria, y desde Delhi hasta Ankara. Aunque para ello mató a centenares de miles de musulmanes, demostró por otro lado una comprensión fuera de lo corriente por la cultura islámica.

Cuando un filósofo notable, un poeta, un músico, un matemático, un experto en ciencias naturales o un artesano excepcional caía en manos de Timur en cualquiera de los países conquistados, le respetaba la vida y se lo llevaba a la nueva capital, Samarcanda. Allí



tuvo lugar, durante el paso al siglo XV, un florecimiento sin igual del arte y de la ciencia islámicos.

Nada le detuvo en su proyecto de traer el progreso económico a la ciudad. Mediante la destrucción de Sarai, la capital de la Horda de Oro en el Volga, de Urguendch, al sur del mar de Aral, y de Almalik, al sur del lago Baikal, cerró las vías de las caravanas que seguían la "Ruta de la seda". Simultáneamente, ofreció la ruta que pasaba por Samarcanda, lo que suponía la anulación de Tabris como capital de los mongoles. Samarcanda se convirtió en nudo de comunicaciones para el comercio con Génova, Venecia y Pisa, las ciudades hanseáticas, Moscú, China, la India y Asia Central.

Timur eligió como futuro soberano de este paraíso a su nieto Muhammad Taragay, nacido el 22 de marzo de 1394 en Sultanieh, que pronto adoptó el nombre de Ulugh Beg ("Gran Príncipe"). A la edad de 10 años lo casaron con una princesa mongola, que procedía por parte de madre del Jan Özbeg. A partir de ese momento obtuvo la prerrogativa de ser llamado también Guragan.

Apoyado por su padre Shah Ruj y por su madre Gauher Shad, que reinaban en Herat y cultivaban las ciencias y las artes, y mediante el trato cotidiano con sabios, artistas y pensadores extraordinarios que Timur mantenía en su entorno, Ulugh Beg pudo desarrollar desde temprana edad su talento. Adquirió conocimientos profundos de matemáticas, astronomía, filosofía, política, historia, medicina y literatura, tanto árabe como persa. Cuando Shah Ruj, en el año 1409, nombró soberano a Ulugh Beg en Samarcanda, tenía éste 15 años.

El reinado de Ulugh Beg

Ulugh Beg recibió de Timur una administración eficaz. El país contaba con una división administrativa asentada y un sistema de impuestos y aduanas bien regulado. Ulugh Beg prosiguió la construcción, iniciada por Timur, de canales de riego, vías de circulación, parques públicos, mezquitas, palacios y serrallos. Samarcanda se convirtió en una de las metrópolis más suntuosas de Asia, tal como Timur había soñado.

Una acertada elección de ministros eficientes, que permanecieron también largo tiempo en sus cargos, le dejó tiempo al soberano para dedicarse a los estudios académicos. Con todo, en lo referente a las campañas militares, Ulugh Beg era tan frívolo que fue desposeído de su cargo por un tiempo, en 1427, por Shah Ruj.

Las madrasas de Ulugh Beg

Del período de Ulugh Beg podemos hacernos una idea inmediata a través de sus construcciones. Algunas se conservan en buen estado. Sus paredes exteriores muestran dibujos geométricos de gran formato de ladrillos vidriados de color azul oscuro, azul turquesa y blanco, así como restos legibles de caligrafía en cúfico. Los portales de sus madrasas están cubiertos





DAVID C. WAUGH

1. VISTA DE SHAH-I-ZINDE, conjunto de mausoleos junto a Samarcanda (*izquierda*). La zona de dominio de Ulugh Beg con las actuales fronteras estatales (*mapa*).





2. LA MADRASA DE ULUGH BEG del año 1420 en Samarcanda. Vista desde el sureste.

3. LAS CELDAS DE LOS ESTUDIANTES de la madrasa de Ulugh Beg. Los pórticos (iwanes) servían también de aulas.

con mosaicos vidriados cromáticos, que representan adornos en forma de estrellas, plantas y frisos con escritura entrelazada de tipo "tulut".

Una madrasa (lugar de estudio) era originariamente una escuela superior unida a un internado. Cumplía las funciones de un seminario teológico, de una escuela jurídica y de una mezquita. Las primeras madrasas de este tipo surgieron en el siglo X. Con la construcción de una madrasa en Bujara, en 1417, creó Ulugh Beg el prototipo de una institución totalmente nueva, una suerte de universidad. En la madrasa de Samarcanda se enseñaba, además de teología, disciplinas más mundanas: astronomía, matemáticas, lógica, geometría, geografía, medicina, derecho, historia, literatura, poesía y árabe. La posesión más valiosa de la madrasa era la biblioteca, con más de 15.000 volúmenes.

El edificio, sin ventanas exteriores (81 × 56 m), circundaba un patio interior cuadrado, que estaba parcialmente pavimentado si bien disponía también de algunos árboles y de una fuente que invitaban al descanso. En cada esquina había aulas cubiertas de cúpulas, aunque también se impartía docencia en los cuatro iwanes. Detrás del iwan principal (capilla oratorio), en dirección a La Meca se encontraba otra mezquita de invierno. Las celdas, dispuestas en dos pisos; sus puertas y ventanas daban al patio. Cada celda estaba dividida en compartimentos para albergar a dos alumnos. Sólo había 50 celdas, de modo que el número de estudiantes se limitaba a 100. Quien fracasaba en los exámenes mensuales debía dejar libre su plaza. El alto rendimiento científico, artístico y técnico atraía a muchos estudiantes, conscientes de su valía, de toda Asia.

"La búsqueda del saber es el deber de todo musulmán y uno de los



4. MOSAICOS DE LA FACHADA en al acceso de la madrasa de Ulugh Beg. La bóveda, con adornos geométricos, fue calculada posiblemente por al-Kashi.

de toda musulmana”. Esta inscripción de la madrasa de Bujara era revolucionaria, ya que la instrucción de las mujeres se reputaba, entre los musulmanes del espacio cultural árabo-persa, una indecencia. Entre los mongoles las mujeres siempre disfrutaron de una consideración más alta. Ulugh Beg dedicó parte de su tiempo a atender las reclamaciones de las mujeres en lo referente a una buena instrucción y las aceptó en las madrasas

Astrónomos colaboradores de Ulugh Beg

El poeta persa Jameh (1414-1492) asistió a las lecciones de Salah al-Milla ad-Din Musa, que provenía de Anatolia y que, por esta razón, era llamado Kazi Zadeh al-Rumi (1364-1436). Enviado por su maestro al-Fanari a Samarcanda, se encontró, entrado ya en los cuarenta años, en 1410, con Ulugh Beg, quien lo nombró profesor suyo y astrónomo principal. La construcción de la madrasa debió de ser una sugerencia de al-Rumi.

Compuso éste, entre otros, unos comentarios al “Compendio de Astronomía de Juwarizm” de Chagmini (m. 1220). Nos ha llegado también un tratado de al-Rumi sobre la determinación de la dirección de La Meca. Su cálculo muy exacto del seno 1º permitió la gran precisión de las tablas de Ulugh Beg. Un comentario inacabado sobre la herencia astronómica de al-Tusi constituyó uno de los prolegómenos para la construcción del observatorio. La memoria de al-Rumi persiste inmortalizada en un mausoleo, coronado por una cúpula, de la necrópolis de Shah-e Zindah.

Del entorno de Ulugh Beg en Samarcanda merece destacarse la figura de Ghiyas al-Milla-ad-Din Yamshid Ma’sud al-Kashi (1380-1429). El soberano lo incluyó en el grupo docente de la madrasa por su claro sentido expositivo; fue también el planificador decisivo del nuevo observatorio. Anteriormente ya se había ocupado del observatorio de Maragheh y sometido a criba sus resultados. Desde 1408 estaba en Samarcanda y colaboraba con Ulugh Beg. Allí creó unas tablas para convertir los distintos sistemas de coordenadas; inventó una tabla de cálculo para ortos planetarios y descubrió un algoritmo para

El observatorio de al-Tusi en Maragheh

No lejos del lugar donde nació Ulugh Beg, el Iljan de Ghazan levantó, tres kilómetros al oeste de Tabriz, un observatorio. Ocupaba el centro de un complejo formado por un hospital, una academia filosófica, una biblioteca y varias escuelas. Pero el observatorio más importante de la región se hallaba en Maragheh, al oeste del lago Urmia. Cuando el joven Ulugh Beg visitó Maragheh, el observatorio se había ya desmoronado. Debemos a Muayyad al-Din al-Urdi un afortunado relato del equipo instrumental. Había un cuadrante de pared, de 4 metros de radio, de cobre, así como un arco de meridiano de 18,4 metros de radio. Los instrumentos se encontraban instalados en el interior de un recinto circundado por un segundo muro de escasa altura. Este muro, cuyo remate caía a la altura de los ojos, servía de “horizonte artificial”. El observatorio fue construido entre 1259 y 1262 por Nasir al-Din al-Tusi (1201-1274) bajo el reinado protector de Hülagü, uno de los nietos de Gengis Jan.

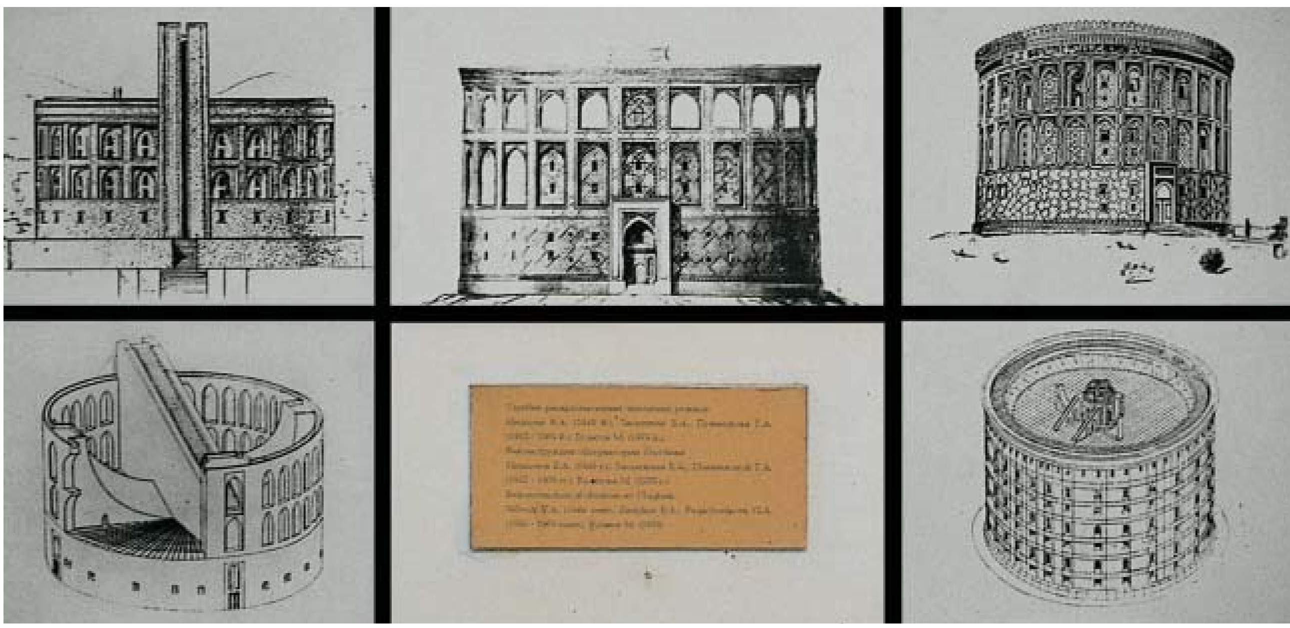
La biografía de al-Tusi no desmerece la tensión de una novela de aventuras. Nacido en Mashad, estudió filosofía, medicina, matemática y astronomía en Nishapur, donde cien años antes Omar Jayyam, astrónomo y matemático, amén de poeta, había llevado a cabo una reforma del calendario para el sultán selyuquí Malikshah (período Malikí). En su juventud al-Tusi se enroló en una secta siíta extremista, la de los Asesinos. Cayó en manos del mongol Hülagü durante el asalto a la fortaleza de Alamut. Dado que Hülagü se interesaba por las ciencias naturales y los horóscopos, trató a al-Tusi con mucho respeto y lo tomó en su séquito. De este modo al-Tusi pudo presenciar el saqueo e incendio de Bagdad en 1258 por los mongoles. Todo indica que al-Tusi reconoció el valor de los tesoros científicos de la “Casa de la Sabiduría” y de los eruditos adscritos a ella. Cuando, un año después, convenció a Hülagü para que construyera un observatorio, pudo contar con los expertos que necesitaba. Creó una biblioteca de 400.000 volúmenes, la mayoría procedentes de Bagdad o robados de Siria y Mesopotamia.

Tras doce años de observaciones al-Tusi publicó el *Zidj-i Iljani* (“Tablas de Iljan”). Compuesto en lengua persa, se tradujo más tarde al árabe. Además de ciertas tablas para saber el movimiento de los planetas, el *Zidj* contiene un catálogo de estrellas. Al-Kashi relata que el observatorio de Maragheh sirvió de modelo para el de Samarcanda.

5. TRAZADO DEL OBSERVATORIO de Samarcanda. La parte subterránea del sextante Fahrí está cubierta por una cúpula cilíndrica.



6. ASPECTO DEL OBSERVATORIO según una propuesta de reconstrucción de V. A. Nielsen (1941), B. A. Zaipkin y G. A. Purgachénkova (1958-1969), y M. Bulatov (1979).



calcular las raíces enésimas de un número natural. Su cómputo del número "pi" concuerda exactamente en las primeras diecisiete cifras con el valor exacto. Redactó la parte teórica del *Zidj* de Ulugh Beg, una famosa obra tabular.

Las construcciones de Ulugh Beg llevaban el sello de al-Kashi, quien aplicó sus conocimientos matemáticos a la resolución de problemas arquitectónicos. Se comprueba en un cielo de estalactitas (bóveda con relieves) creado con muchos polígonos tridimensionales, algunos de ellos con sus superficies lisas y otros, retorcidas. Calculó la superficie de la cúpula cubierta con mosaicos que tenía que coincidir con la de los relieves de la bóveda interna.

Al-Kashi dedicó sus escritos astronómicos al soberano, cuyas capacidades intelectuales y cuyo talento organizador admiraba. Describió a Ulugh Beg como "dotado por el genio divino, con humana perfección, con cualidades angélicas y con rasgos característicos de los profetas". En el intercambio epistolar con su padre que se ha conservado, expone al-Kashi las sesiones científicas moderadas por Ulugh Beg. Fuera del soberano mismo y de al-Rumi ninguno de los 60 sabios merecía el aprecio de al-Kashi.

En las sesiones consagradas a debatir posibles fallos en los programas de observación, Ulugh Beg detestaba la adulación servil. Para descubrir a los aduladores, caía a veces en errores manifiestos o formulaba preguntas capciosas. Ulugh Beg fue el tercero que llevó a cabo estudios sobre Maragheh. Impartió cursos sobre al-Tusi y sobre su discípulo Kutb al-Din Mahmud ibn Masud Shirazi (m. 1311).

Cuando murió al-Kashi en el año 1429, le sucedió en la dirección del observatorio Ala-ud-Din Ali ibn Muhammad Kushi (1402-1472). Considerado el más conspicuo de los sabios en Samarcanda, Ulugh Beg le distinguió con el título de "mi más querido hijo".

El observatorio de Samarcanda

El observatorio de Ulugh Beg no fue descubierto hasta el año 1908. Vladimir Vyatkin, arqueólogo aficionado ruso, lo halló a una latitud norte de 39º 37' 28", siguiendo una antigua descripción del siglo XVII. Encontró las ruinas junto al pie oriental de la colina de Chupan-Ata, en un altozano de 21 metros de altura, contiguo al canal de Abu

Rahmat. Abarca una extensión de norte a sur de 170 metros y una extensión este-oeste de 85 metros. Su situación, lindante con el desierto, le garantiza una visibilidad excepcional. Alrededor del observatorio se extendía un parque; allí solía retirarse el soberano para meditar.

Hasta el año 1948 se fueron limpiando los cimientos y la parte subterránea del sextante Fahrí (*véase la figura 5*). Las últimas excavaciones de Shishkin de los años 1953 y 1965 proporcionaron datos precisos. Era evidente que el observatorio no sólo indicaba un eje que seguía el meridiano, sino también un eje vertical. No es seguro si dos fragmentos de un arco de ocho a nueve metros de radio pertenecían al eje este-oeste. Para disponer el edificio conforme al meridiano exactamente, se planificó con anterioridad la colina donde iba a levantarse. Después de cinco años de obra, el observatorio se inauguró en 1429.

El fundador del imperio mogol de la India, Babur, un descendiente de Timur de quinta generación, pudo contemplar aún el observatorio, a finales del siglo XV. Lo describió como un gigantesco cilindro de tres pisos. Su altura se estima entre 30 y 33 metros. Sin contar el zócalo de mármol, el diámetro tenía una longitud de 46,65 m, y los muros, un espesor de 1,08 m. En el lado norte, bajo el arco de meridiano, se abría un gran portal en forma de iwan. Al igual que en las madrasas, una ornamentación de gran formato geométrico embellecía el zócalo. De la superficie decorada profusamente se recuperaron abundantes fragmentos de esmaltados de color amarillo teja.

Puesto que las fuentes no aportan información alguna sobre la construcción y utilización del observatorio, debemos movernos entre conjeturas. Algunos esquemas que reproducen el aspecto del observatorio, realizados por Nielsen, Pugachénkova y Bulátov entre 1949 y 1979, resultan muy discutibles. El observatorio de Maragheh, que sirvió de modelo, es posible que fuera muy parecido. La prolongación de la tradición hasta el Djantar Mantars de Djai Singh II en Djaipur y Delhi en la India permite también retroceder, concluyendo en el modelo de Samarcanda.

El instrumento principal, llamado sextante Fahrí, no era adecuado para ciertas tareas; por ejemplo, la observación del último pico de la Luna y del primero (es decir, del comienzo del mes lunar) para determinar la Luna nueva. Esta tarea se acometía en la parte superior del observatorio, donde existía una terraza para las observaciones con otros instrumentos con los que se estudiaban los fenómenos en el horizonte oriental y en el occidental. Allí se podía determinar también las elongaciones de los planetas interiores. Posiblemente se observó también en Samarcanda el planeta Mercurio.

En el prefacio de su *Zidj-i Muhammad Shahi*, Djai Singh declara haber construido instrumentos como los de Ulugh Beg según antiguas descripciones. Los dos fragmentos hallados de un arco de ocho a nueve metros de radio podrían, pues, pertenecer a un instrumento parecido





DAVID C. WAUGH

7. EL SEXTANTE FAHRI (*izquierda*) desde el norte. A la derecha, el sextante Fahrí desde el sur.



8. LAS PLACAS DE MARMOL del arco de meridiano con los canales de deslizamiento y las muescas transversales para un visor móvil.

al de Samrath Yantra de Djaipur. También se da cuenta de un cuadrante de mármol, de un *triquetrum* y de diversas esferas armillares de madera o de metal que medían aproximadamente un metro, móviles quizá. Para medir el tiempo se utilizaba probablemente un reloj de sol o una clepsidra (reloj de agua), que se graduaban observando el paso del Sol por el meridiano y permitían, además, determinar la ecuación del tiempo.

La construcción cilíndrica ofrecía espacio suficiente para la instalación de materiales e instrumentos. Había talleres de restauración, aunque las esferas armillares se construían en otro lugar. Un ambiente caldeado y una gran cocina proporcionaban el confort necesario durante los festines que Ulugh Beg organizaba en el observatorio. Los resultados de las observaciones se archivaban en el escritorio. Habría, a buen seguro, un gabinete de copia donde las tablas de Ulugh Beg se iban reproduciendo sobre el terreno. Dado que la gran biblioteca se encontraba en la madrasa, el observatorio disponía de una pequeña biblioteca para facilitar las tareas de cómputo. La sala de sesiones no sería muy grande, pues el número de personas adscritas al observatorio era muy pequeño y vivían en un edificio anejo.

Así retrata Abd ar-Razzak su interior: “Las imágenes de los Nueve Cielos y de los Siete Círculos Celestes estaban reproducidas maravillosamente y trazadas de manera incomparable en el interior de aquel edificio sobresaliente, con los grados, minutos, segundos y décimas de segundo; también se veían las esferas giratorias con los círculos de las siete estrellas móviles, imágenes de las estrellas fijas, el globo terráqueo con sus divisiones en climas, montes, océanos, desiertos y otros objetos similares”.



9. OBSERVACIONES en el sextante Fahrí con el visor móvil.

El sextante Fahrí

Del instrumento más famoso, el sextante Fahrí, queda sólo la parte subterránea en un sótano de 2,5 metros de ancho y a una profundidad de hasta 11 metros. Entre las dos paredes paralelas laterales discurre un doble arco de meridiano de placas de mármol cuyo grosor abarca de diez a doce centímetros. Ambos arcos descargan sobre unos muros inferiores de ladrillo de 29 centímetros de anchura y separados unos de otros 51 centímetros. Hay una escalera entre los arcos, enmarcados, a su vez, por dos escaleras laterales. El extremo superior del arco acababa posiblemente a la altura de la línea del techo.

Sobre las placas de mármol pulimentadas aparece una escala graduada de alturas. En el arco occidental se distinguen unas graduaciones con cifras árabes a lo largo de una muesca en la superficie. Las divisiones mayores pertenecían a los grados. Al inmenso radio del arco de 40,213 metros corresponde, para un grado, un segmento de arco de 701,8 milímetros. La subdivisión menor estaba en 0,4 milímetros y correspondía a 2 segundos de arco.

Se advierte, sobre las placas, un canal de deslizamiento; en él se colocaba un visor corredizo que funcionaba según el principio de la dioptra (muesca y punto de mira), del que se recuperaron algunos fragmentos. Como punto de mira se utilizaría en el “oculus”, que se encontraba en el centro del arco, un anillo con unos hilos cruzados. Durante las observaciones de los planetas, el astrónomo y sus ayudantes subían o bajaban por la escalera hasta que el planeta era visible a través del “oculus” y del punto de mira del visor. Durante las observaciones del Sol se formaba la imagen solar, que entraba por el “oculus” como en una cámara oscura en mitad de la escalera, sobre un listón que se deslizaba por dicho canal. En los orificios abiertos a cada lado de la superficie de mármol se fijaba el listón y así se comparaba la posición del Sol con la del día siguiente. Mediante ese procedimiento se podían verificar los solsticios, ya que el retroceso del Sol era observable inmediatamente. El “oculus” correspondía a las dimensiones del disco solar.

Hay que imaginarse la cámara donde se encontraba el sextante como una estancia sin ventanas, para posibilitar el contraste de la imagen solar. Ahora bien, puesto que los observadores tenían que subir y bajar por la escalera con una mínima seguridad, se dejaba penetrar algo de luz a través de una puerta que daba al norte.

La graduación de 58º hasta 81º se aprecia todavía hoy en la parte inferior del arco. Los arqueólogos descubrieron entre los escombros dos placas de mármol de un tamaño de unos 70 cm que pertenecían a la parte superior. Una de las placas contiene los grados 20 y 21; la otra, sólo los 19. Si se trata de las últimas placas, el arco de meridiano sería un instrumento cuya graduación, que abarcaría de los 19 grados hasta los 80, correspondería a un arco de circunferencia de 61 grados. De todo ello se deduce que nos hallaríamos ante un sextante, no ante un cuadrante, pues éste cubre un cuarto de circunferencia.

La escala de 19º a 80º permite la medición de todos los cruces del meridiano del Sol, la Luna y los planetas. El Sol se mueve en Samarcanda entre una altura de 26º,81 (invierno)

El autor

BERNHARD DU MONT, antiguo miembro del Instituto Astronómico de Cálculo en Heidelberg, desde hace 25 años enseña en Constanza.

y 73º,83 (verano), la Luna, entre una altura de 21º,66 y 78º,88. Mercurio varía entre una altura de 19º,8 y 80º,8. Con todo, debido a su proximidad al Sol, quizá no pudiera observarse en el meridiano.

El sextante facultaba para determinar los solsticios y, con ellos, la oblicuidad de la eclíptica. También hacía posible fijar la posición del ecuador junto con la latitud geográfica del observatorio. Con el sextante se podían determinar también los equinoccios y la precesión del eje de la Tierra. Con todo, el famoso catálogo de estrellas de Ulugh Beg no se basa en observaciones hechas con este instrumento. El sextante es el punto culminante de una larga serie de realizaciones de la astronomía medieval islámica. Mientras estuvo en servicio, Samarcanda fue la capital astronómica del mundo. Sólo 150 años más tarde consiguió superar Tycho Brahe la exactitud de las mediciones de Ulugh Beg.

El *Zidj de Ulugh Beg*

El aforismo según el cual "las tareas principales de los astrónomos son los calendarios y los vaticinios" podría servir de lema para el *Zidj de Ulugh Beg* ("Tablas de Ulugh Beg"), su obra principal. Escrita originariamente en tadjikistano, se tradujo pronto al persa y al árabe y, sólo más tarde, a las lenguas occidentales.

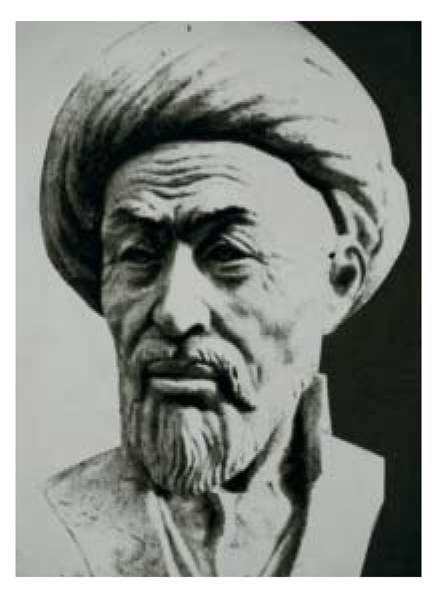
A pesar de la época intermedia de observación del catálogo de estrellas (mayo de 1437), Ulugh Beg realizó modificaciones hasta poco antes de su muerte. La última fecha que se cita en el *Zidj* es el 28 de enero de 1444, que Ulugh Beg menciona como el comienzo del ciclo chino de Shan Wan. De este modo el *Zidj* sería el resultado concreto de 30 años de observaciones.

Consta de cuatro libros y de un prólogo. El primer libro del *Zidj*, de 13 capítulos, se consagra a los cálculos de calendario. Según éste se computa la duración del año sideral en 365 días, 6 horas, 6 minutos y 18 segundos, es decir, sólo 68 segundos más que el valor actual.

El libro segundo, en cuya confección al-Kashi tiene una importancia esencial, contiene en sus 22 capítulos los principios matemáticos del *Zidj*. En esta parte se utilizan algoritmos para resolver ecuaciones de tercer grado. Cuando se aplica la trigonometría plana y la esférica, sólo se calculan incorrectamente las dos últimas posiciones de 18 decimales del seno de 1º. Sobre este valor las tablas basan las funciones trigonométricas. Otros capítulos se ocupan de la astronomía esférica, la geografía matemática y la astrología. Se explica cómo se llevan a cabo las observaciones y el mecanismo de su valoración. A la oblicuidad de la eclíptica se le da un valor de E = 23º 30' 17", es decir, 32" menos de su valor. La precesión tiene un valor, según Ulugh Beg, de 1º cada 70 años, es decir: p = 51",43 por año. El valor actual para 1347 es: p = 50',39 por año, en torno a un segundo de arco más pequeño.

En uno de los capítulos se definen los conceptos matemáticos, astronómicos y astrológicos utilizados por Ulugh Beg. En el apartado titulado "Las doce casas celestes" propone la división del círculo del zodíaco. En el epígrafe "La cabeza y la cola del dragón" recupera el mito antiguo según el cual el Sol o la Luna son devorados por un dragón cuando la Luna se encuentra en un nódulo. De este modo muestra la forma de predecir los eclipses. Cierran este segundo libro unas tablas con los nombres y las coordenadas de 300 ciudades del cuarto habitado del hemisferio oriental, así como de Córdoba.

En los 13 capítulos del tercer libro Ulugh Beg rinde cuentas de los planetas y de la astronomía estelar. Describe el movimiento aparente del Sol, la Luna y los planetas en una concepción geocéntrica del universo. Esto corresponde a una versión corregida del *Almagesto*, la obra más



10. BUSTO DE TAMAÑO NATURAL de Ulugh Beg, reconstruido con métodos técnicos de criminalística por Gerasímov.



11. ULUGH BEG EN EL CIRCULO de grandes astrónomos (de izquierda a derecha: Galileo, Tycho, Ulugh Beg, Timocares, Hiparco, la musa celeste Urania, el príncipe Hass, Regiomontano y Copérnico). Grabado en cobre de 1687.



12. MONUMENTO A ULUGH BEG en la colina del observatorio.

importante del antiguo astrónomo griego Ptolomeo. Se puede encontrar, incorporado dentro de una teoría sobre el movimiento de los planetas, el método para calcular "la distancia desde el Sol y desde la Luna al centro de la Tierra".

El valor del *Zidj* de Ulugh Beg reside, sobre todo, en el catálogo de estrellas, que contiene el resultado de 30 años de observaciones y se basa en un compendio de fórmulas de gran exactitud. En el apartado "Determinación del emplazamiento de las estrellas fijas en longitud y latitud" Ulugh Beg explica la entrada de datos para este catálogo.

En el libro cuarto se aborda la astrología matemática, que debe proporcionar la base para las predicciones. Con todo, Ulugh Beg no acompaña ningún tipo de instrucciones para interpretar un horóscopo que ha sido levantado. Sí se pueden encontrar ciertas afirmaciones sorprendentes; por ejemplo, por término medio un embarazo, desde la concepción hasta el parto, dura 273 días, 5 horas y 10 minutos, es decir, exactamente 10 órbitas lunares. También se calcula la edad del mundo: desde el comienzo del universo hasta la era de Noé han transcurrido 180.000 años solares, y 4180 años solares desde el primer año del diluvio universal hasta la entronización de Malikshah (1072). Si ambas cifras se suman a la era malikí se obtiene la edad del mundo.

De la producción de Ulugh Beg nos ha llegado también su *Tratado matemático*. La única copia que existe se conserva en Aligarh. No hay que descartar, sin embargo, que en los archivos de la Academia de Ciencias del Uzbekistán dormiten manuscritos que podrían dar fe de determinados acontecimientos celestes. Por botón de muestra, tres "novas" (9.9.1430; 4.1.1431; 11.3.1437) que podían ser observadas en Samarcanda a simple vista, estallaron en el período de observación de Ulugh Beg.

Ulugh Beg y el Islam ortodoxo

El fin de la astronomía en Samarcanda se debe, en última instancia, a las dificultades que tuvo Ulugh Beg con fundamentalistas islámicos. A diferencia de Timur y de Shah Ruj, creyentes cumplidores de todos los preceptos religiosos, Ulugh Beg permitió el relajamiento de las costumbres. Algunas miniaturas del *Libro de los reyes* muestran a Ulugh Beg y a miembros de su familia rodeados de su corte. Sobre un fondo de ricas alfombras y tapices, les sirven muchachas de cadera cimbreante al son de la música, mientras "hermosos efebos" ofrecen refrescos. Con motivo de la circuncisión de su hijo Abd al-Aziz, Ulugh Beg manda que se sirva vino al pueblo. Parece ser que el jefe de la policía dijo a su soberano: "Has destruido la fe de Mahoma introduciendo las costumbres de los infieles".

Sin embargo, lo que más contrarió a los clérigos sufíes, integrados en la orden derviche de Nakshbandi, fue la filosofía extranjera y las matemáticas, así como el estudio de las ciencias naturales en las madrasas. Los derviches consideraban que todo lo que un musulmán tenía que saber ya era conocido y había sido descrito en el Corán y en los Hadices (Tradiciones). Si se pretendía sobrepasar eso, se usurparían los secretos de Alá.

Un Hadiz es un dicho atribuido al profeta Mahoma. Consta de dos partes, el propio dicho y el *isnad*, esto es, la cadena de transmisores que de manera fiable y sin interrupciones debe remontarse hasta el profeta. El imam al-Bujari (810-870) recogió en sus viajes 800.000 Hadices y, tras rigurosas comprobaciones, redujo a 7400 los auténticos. Mediante su conocimiento acrítico de los Hadices, los derviches apenas lograban convencer en los debates mantenidos en las madrasas con los profesores y estudiantes de pensamiento analítico. Por ello Ulugh Beg estimulaba a aquellos teólogos que sobresalían en la filosofía y en la lógica. No molestaban, aunque él antepusiera las ciencias naturales como fuente de conocimiento.

El menosprecio que los teólogos de mente abierta y otros científicos manifestaban hacia los derviches incultos resultó insoportable para éstos. Cuando Ulugh Beg obligó al shaij Jwaya Muhammad Parsa, superior de los derviches Nakshwandi en Bujara, a rendir cuentas, ante los "especialistas del Libro de Dios" de la madrasa de Samarcanda, del *isnad* de diferentes Hadices que los fundamentalistas invocaban con martilleante frecuencia, el abismo entre los derviches y Ulugh Beg con sus teólogos se hizo insalvable.

El clero establecido temía además por sus prebendas. El soberano prefería sabios en los puestos administrativos. Durante el reinado de Timur les habían ido bien las cosas. Este había colocado a los seguidores del profeta en los puestos de juez y de inspectores de los mercados que controlaban el comercio. También había puesto en manos de los mullahs la administración de la vida pública; a cambio, se aseguraba su apoyo durante las crisis políticas. El respaldo del pueblo, que no se dejaba dirigir por académicos, le faltó pronto a Ulugh Beg. Cuando se propagó la declaración de Ulugh Beg —"la religión se desvanece como la niebla, los imperios pasan y sólo permanecen eternamente las obras de los sabios"—, muchos mullahs, aterrorizados, consideraron inevitable la muerte de Ulugh Beg.

La muerte de Ulugh Beg

Cuando el 12 de marzo de 1447 murió Shah Ruj en el oeste de Persia, Gauher Shad colocó a Abd al-Latif, hijo de Ulugh Beg, al frente

del ejército. Como único hijo vivo de Shah Ruj y único nieto de Timur, Ulugh Beg exigió el mando del imperio mongol, pero no encontró apoyo. En las luchas sucesorias se alió Abd al-Latif con Hodsha Ubaidullah Akrar, jefe de la orden de Nakshband.

El pulso lo ganó Abd al-Latif contra su padre. Ulugh Beg y su hijo Abd al-Aziz se rindieron al vencedor. Aquél pidió gracia y prometió que únicamente se dedicaría a la ciencia. Abd al-Latif se lo concedió y lo mandó de peregrinación a La Meca. Pero, a la vez y a escondidas de Ulugh Beg, convocó un juicio según la *sharia*. Los dignatarios religiosos elaboraron un decreto (*fatwa*), según el cual los imanes nombrados por Ulugh Beg en Samarcanda debían devolver sus credenciales. Además, reconocieron a un comerciante llamado Abbas, cuyo padre había sido ajusticiado por Ulugh Beg, el derecho a la venganza de sangre.

Ya durante el primer día de la peregrinación, el 27 de octubre de 1449, Ulugh Beg, acompañado de una pequeña escolta, fue desviado mediante engaño hacia la aldea de Begum, 15 kilómetros al sur de Samarcanda, donde le esperaban Abbas y los suyos. El vengador lo decapitó de un solo golpe de espada. La cabeza de Ulugh Beg fue expuesta sobre el *iwan* de su madrasa en Samarcanda.

Pocos días después Abd al-Latif hizo asesinar a su propio hermano menor Abd al-Aziz. Tampoco él se libró de muerte violenta, al año siguiente. Uno de los conjurados, Abd Allah, hizo trasladar el cadáver de Ulugh Beg al mausoleo de Timur, Gur-i Mir, donde también reposaban los restos de Shah Ruj y de otros miembros de la familia. Las tumbas fueron excavadas por el antropólogo Mijail Gerasímov en 1941.

La divulgación de las tablas de Ulugh Beg

Temerosos del fanatismo religioso que imperaba en Samarcanda tras la muerte de Ulugh Beg, los científicos huyeron. El último director del observatorio, al-Kushdji, salvó una copia del *Zidj* en su huida, a través de Jurasán, hacia la iraní Kirman; allí residió hasta 1465. Después vivió ocho años en Tabris. En 1473 se estableció definitivamente en Estambul, donde agrupó a varios eruditos en una *madrasa* junto a Santa Sofía y organizó la investigación matemática y astronómica. En Estambul se tradujo el *Zidj* del persa al árabe; en las postrimerías del siglo XV, trabajaban con esa obra los astrónomos de todo el mundo islámico.

Cuando el *Zidj* llega a Occidente ya había sido superado por las mediciones, más precisas, de Tycho y por las teorías de Kepler. En el año 1648 John Greaves, profesor de la Universidad de Oxford, publicó una traducción latina: “Quibus accesserunt, Insigniorum aliquot Stellarum Longitudines, et Latitudines, Ex Astronomicis Obsevationibus Uligi Beigi, Tamerlani Magni Nepotis”. El catálogo de estrellas no fue impreso hasta 1655 por Thomas Hyde. Edmond Halley comparó posiblemente las posiciones de algunas estrellas de este catálogo de entre las 341 estrellas del cielo austral con las coordenadas del *Zidj*, sin encontrar grandes variaciones. Johannes Hevelius ya utilizó en su *Prodromos Astronomiae* (1690) los datos de Ulugh Beg. En el tomo tercero, póstumo, de su *Historia Coelestis Britannicae* (1725) comparó John Flamsteed el catálogo de Ulugh Beg con otros catálogos y lo comentó. En el museo del observatorio se muestra un grabado occidental del año 1687 con Ulugh Beg en un círculo de los astrónomos más destacados.

Todavía en el siglo XVIII, el maharajá Jai Singh II de Jaipur construía cinco observatorios siguiendo las pautas de Ulugh Beg, con instrumentos gigantescos y midió de nuevo en el *Zidj-i Muhammad Shahi* las estrellas del “príncipe mártir” 300 años más tarde. Ahora, un cráter de la Luna de 54 km de diámetro honra el nombre de Ulugh Beg.

La decadencia de la astronomía en Samarcanda

Puesto que Abd al-Latif se interesaba también por la astronomía, el observatorio pudo mantener su actividad por lo menos durante un año. Una escuela astronómica subsistió también un tiempo: Moin ud-Din, que completó el catálogo de estrellas, tuvo como continuador a un hijo suyo llamado Mansur Kashi, astrónomo que enseñó al famoso Abdul-Ali ibn Muhammad Birjandi.

Se ignora cuándo fue saqueada la biblioteca. Hacia el año 1500 el edificio del observatorio se había convertido en cantera de mármol para nuevas construcciones. Para borrar cualquier recuerdo de su función primigenia, los derviches declararon la colina sepulcro de “40 vírgenes”, construyeron un mausoleo y crearon un lucrativo lugar de peregrinación.

A media altura de la colina se levanta hoy una estatua monumental de Ulugh Beg, esculpida por artistas uzbecos en 1964 (*véase la figura 12*). El gran astrónomo apoya la mandíbula sobre una mano. Parece meditar sobre el modelo copernicano, representado a sus pies, que nunca fue el suyo.

Bibliografía complementaria

ULUGH BEG UND SEINE ZEIT. W. Cathold. Leipzig 1935.

ULUGH BEG’S FORGOTTEN OBSERVATORY. E. W. Piini, en *Sky & Telescope*, págs. 542-544; junio, 1986.

ULUGH BEG AND HIS OBSERVATORY IN SAMARKAND. H. Hobden, en *Astronomy Now*, págs. 32-36; agosto, 1988.

RECONSTITUTION DE L’OBSERVATOIRE DE SAMARKAND. J. F. Oudet, en *Publications de l’Observatoire Astronomique de Strasbourg*, págs. 201-217; noviembre, 1992.

AMIR TEMUR IN WORLD HISTORY. Dirigido por A. Iriskulov. Tashkent, 1996.

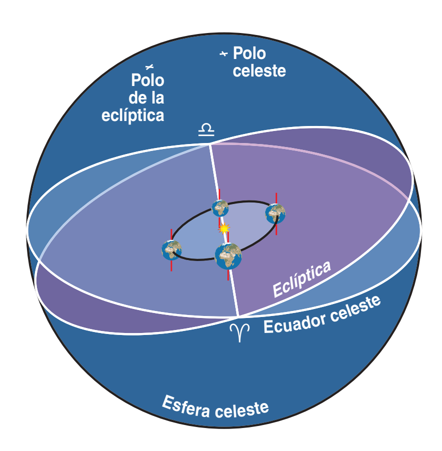
Las tablas de Ulugh Beg

El núcleo del *Zidj de Ulugh Beg* (“Tablas de Ulugh Beg”) es un catálogo con 1018 estrellas, sus brillos y posiciones. ¿Qué lugar ocupa ese elenco, comparado con los grandes catálogos de Ptolomeo y de Tycho Brahe?

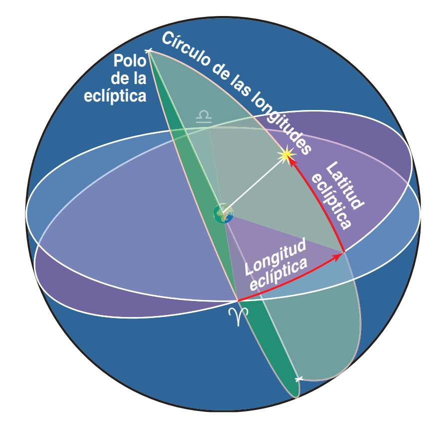
Heiner Schwan

La obra de Ulugh Beg, soberano de Samarcanda (1394-1449), se alinea junto a una serie de observaciones astronómicas importantes que se remontan a los astrónomos griegos Timocares (*ca.* 280 a.C.) y, sobre todo, Hiparco de Nicea (*ca.* 190-120 a.C.). Este último fue también quien comprobó, a través del cotejo de las propias observaciones de la estrella Spica de la constelación de Virgo con las de Timocares, 140 años más antiguas, que la longitud eclíptica de esta estrella había aumentado unos 2 grados. Aunque Hiparco consideraba las observaciones anteriores menos exactas, llegó a la conclusión de que en esa diferencia se encerraba un desplazamiento del punto del equinoccio de primavera sobre la eclíptica (*véase la figura 2*). Esto tiene que ver con el hecho de que la posición del eje de la Tierra en comparación con el espacio circundante no es fija. Dicha posición describe, en un intervalo de 26.000 años, un círculo alrededor del eje del plano de la órbita terrestre, es decir, de la eclíptica. La Tierra se comporta aquí como un compás; debido a su situación inclinada, además de su propia rotación rápida, describe un movimiento rotatorio lento de la posición de su eje (precesión).

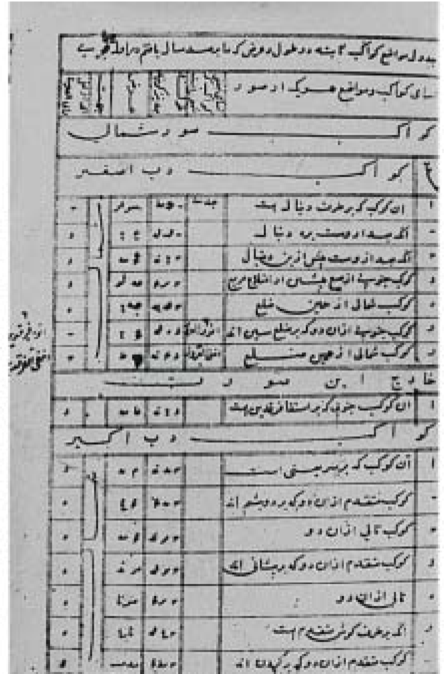
En razón de este movimiento, el punto equinoccial de primavera, es decir, la intersección del ecuador celeste con el plano de la órbita terrestre a lo largo de la eclíptica, se desplaza; realiza en unos 26.000 años aproximadamente un recorrido completo. El meridiano que pasa por el punto equinoccial de primavera recibió el apelativo de “meridiano cero” dentro del sistema de coordenadas de la eclíptica. Después de observar un incremento de las longitudes eclípticas de Spica de unos 2 grados a lo largo de 140 años, Hiparco dedujo una velocidad de precesión de 51,4 segundos de arco



1. POSICION DEL PLANO de la órbita terrestre (eclíptica) y del ecuador celeste. Los puntos de intersección corresponden al equinoccio de primavera (*delante*) y el de otoño (*detrás*).



2. SISTEMA DE COORDENADAS eclípticas con la longitud y la latitud.


3. TRES PAGINAS del *Zidj* de Ulugh Beg.

al año. Este es un dato de una precisión sorprendente, si lo comparamos con los datos modernos (el valor IAU para el año 140 a.C. da un valor de 49,8 segundos de arco al año). Como punto de intersección entre el ecuador celeste y la eclíptica, el equinoccio de primavera se localiza observando el Sol en el firmamento.

Así se veía el firmamento

Con ello se presenta el problema, por lo menos en aquel tiempo (el telescopio aún no se había inventado), de cómo comparar las estrellas, sólo observables de noche, con las observaciones diurnas del Sol, y con ello deducir las longitudes eclípticas de las estrellas. Ello es posible si se toma la Luna como lazo de unión.

De día, se observa la Luna con relación al Sol, y de noche, las estrellas con relación a la Luna. Especialmente útil resulta el momento de un eclipse total de Luna, ya que entonces el ángulo de separación entre el Sol y la Luna es exactamente de 180 grados. Del ángulo medido entre una estrella y la Luna se deduce el que existe entre una estrella y el Sol. Inferencia de la que sacaron partido Timocares e Hiparco en sus observaciones de Spica. La circunstancia de que las observaciones fueron realizadas durante eclipses nos permite fijar hoy la fecha exacta de los acontecimientos.

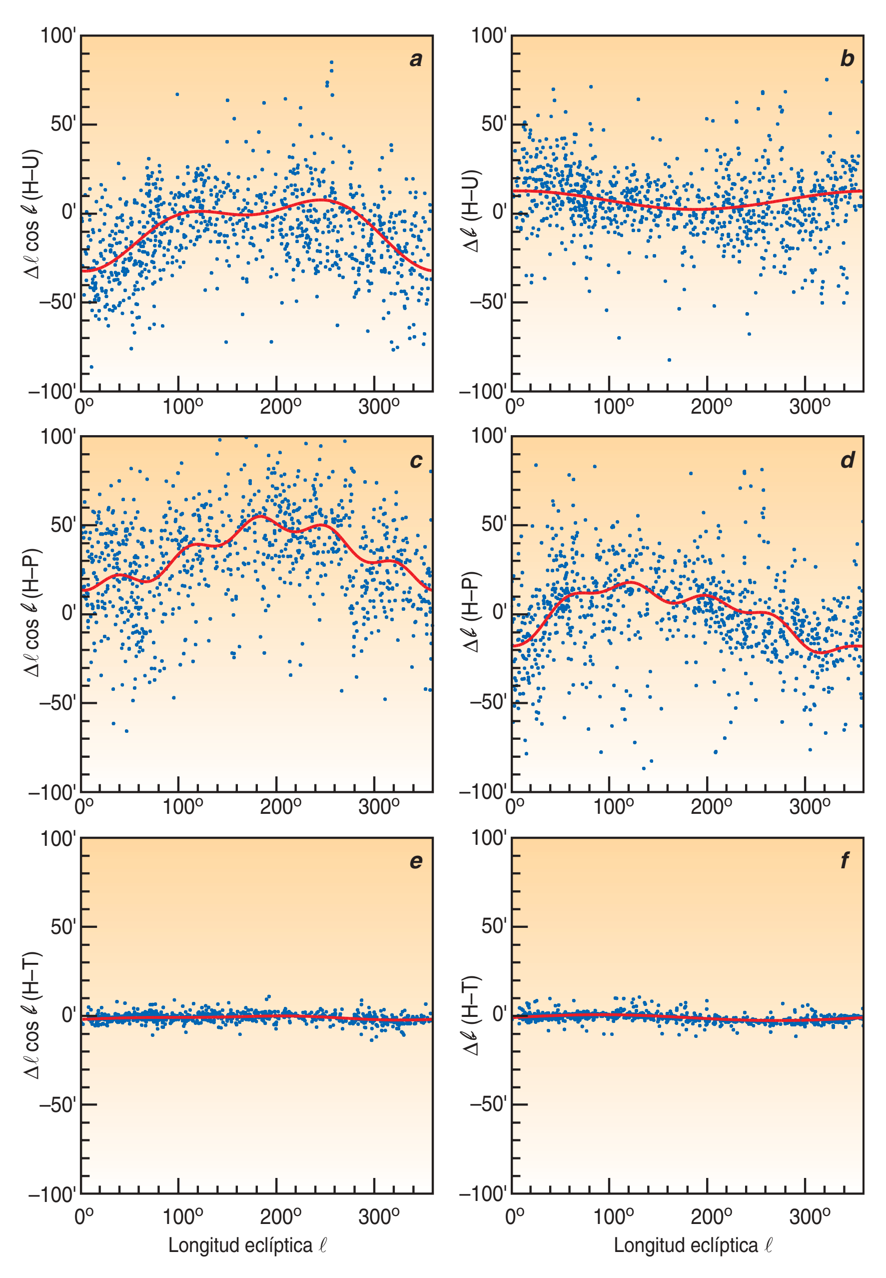
Ptolomeo

Los resultados y conocimientos de Hiparco se transmitieron a la obra, grande y sistemática, de Claudio Ptolomeo (*ca*. 90-160 d.C.), que, vehiculada por los árabes, recibió el nombre de *Almagesto*. En el *Almagesto* compiló Ptolomeo los conocimientos de la astronomía antigua, expuso otros muchos propios e ideas importantes derivadas de la concepción geocéntrica del mundo. Al difundirse la obra de Ptolomeo, lo escrito con anterioridad se dio por superado y superfluo. Por ello no nos han llegado ni originales ni copias de Hiparco. Ignoramos cómo realizaba sus observaciones.

El *Almagesto* contiene también un catálogo estelar en el que Ptolomeo aporta las coordenadas eclípticas de 1028 estrellas. Estas coordenadas mantuvieron su vigencia hasta la época de Tycho Brahe (1546-1601). Aquí hemos utilizado el catálogo ptolemaico en la versión de C. H. F. Peters y E. B. Knobel. Ptolomeo dividió las estrellas en seis clases, en razón de su magnitud, con subdivisiones de un tercio. Las estrellas más brillantes se integran en la clase de magnitud 1; las más débiles, en la clase 6. Nuestro sistema actual de clasificación del brillo se rige por este baremo. En el firmamento, las estrellas se agrupan, además, en 48 constelaciones. Nuestras constelaciones continúan fundándose en esa distribución.

Tycho Brahe

Tycho Brahe fue el primer astrónomo del Renacimiento que cuestionó las observaciones de Ptolomeo. Sospechaba que se basaban en mediciones de Hiparco recalculadas para otra época; la objeción parece afectar a un gran número de estrellas clasificadas, aunque no por ello disminuye el mérito de Ptolomeo, ya que se debe tomar el catálogo en relación con la gran idea de este científico de elaborar una



4. CATALOGOS DE ESTRELLAS de Ulugh Beg (U), Ptolomeo (P) y Tycho Brahe (T) comparados con el catálogo *Hipparcos* (H). Las diferencias $\Delta\ell \cos \ell$ en las longitudes eclípticas y $\Delta\ell$ en las latitudes eclípticas se aplican en función de las longitudes eclípticas.

teoría global sobre el movimiento de los cuerpos celestes. Debemos a G. Grasshoff una exposición detallada de la historia del catálogo de Ptolomeo. Un catálogo que dio sus frutos, incluso en el Renacimiento, a conocimientos astronómicos. Y más tarde, Edmund Halley, a comienzos del siglo XVIII, midió, en Greenwich, los movimientos propios de Sirius, Arcturus y Aldebarán y comparó sus propias observaciones con las del *Almagesto*.

Ulugh Beg

En la docena de siglos que transcurrieron entre Ptolomeo y Ulugh Beg se midieron sólo algunas posiciones estelares. Merecen mencionarse las tablas de Ibn Yunus y la uranometría de Abd al-Rahman al-Sufi.

Ulugh Beg no realizó las observaciones de su catálogo de estrellas con el sextante Fahrí, sino con su esfera armilar. Utilizada desde la antigüedad, la esfera armilar funciona con dos círculos, perpendiculares entre sí, y unas mirillas dispuestas en ellos. Uno de los círculos, fijo, está orientado hacia el plano del ecuador celeste o de la eclíptica. El otro, perpendicular, gira en torno a su eje vertical. Mediante el enfoque del cuerpo celeste y la lectura de los dos círculos se podía medir unos ángulos en dos planos, para así obtener las coordenadas de las estrellas.

Ulugh Beg fue el último representante sobresaliente de la astronomía islámica. Recogió sus observaciones en el *Zidj Ulugh Beg* ("Tablas de Ulugh Beg"). Pero las observaciones comenzaron ya en 1420 con Salah ad-Din Musa, maestro del soberano, y Ghiyas ad-Din Yamshid. Tras la muerte de ambos astrónomos concluyó Mu'in ad-Din el programa de observaciones en 1437. No está muy claro si Ulugh Beg publicó su obra originariamente en turco, persa o árabe. Algunos indicios apuntan a una versión original en persa. Hacia finales del siglo XV existía una edición árabe, difundida por todo el orbe islámico.

Una introducción subdividida en cuatro partes precede al conjunto de tablas de Ulugh Beg. A su vez, cada parte consta de una serie de capítulos dedicados a diversas cuestiones astronómicas y métodos. La determinación de las posiciones estelares se entroniza en el capítulo 13 de la tercera parte: "La fijación de las posiciones de las estrellas fijas en longitud y latitud".

En total, el catálogo contiene 1018 estrellas, que, salvo contadas excepciones, concuerdan con las de Ptolomeo. De ellas, según el propio Ulugh Beg, no pudo observar 27, ya que estaban situadas demasiado al sur de Samarcanda. Junto a éstas hay una serie de pares de estrellas que nos llevan a compararlas con las posiciones de Ptolomeo (porque las coordenadas coinciden o las diferencias de las longitudes de ambas estrellas son iguales a las correspondientes de Ptolomeo); no fueron observadas por Ulugh Beg, sino introducidas por Ptolomeo y difundidas sólo en el año 1437. Del catálogo, pues, se reducen a 700 las

estrellas que pueden considerarse observaciones originales de Ulugh Beg.

Comparación con el catálogo HIPPARCOS

El "impasse" sufrido por las ciencias experimentales a lo largo de casi un milenio y medio se refleja también en el desarrollo de la exactitud de las mediciones de las posiciones estelares. Desde Ptolomeo, apenas se realizaron progresos en la exactitud de las observaciones. Sólo las mediciones de Tycho en el siglo XVI condujeron a la confección de un catálogo de estrellas con posiciones mucho más exactas. Esta larga pausa se pone de manifiesto con algunos gráficos y cifras. Por eso compararemos los catálogos de Ptolomeo, Ulugh Beg y Tycho con las mediciones del satélite astrométrico HIPPARCOS. La misión HIPPARCOS proporcionó posiciones y movimientos propios para más de 100.000 estrellas, en el período comprendido entre 1989 y 1993, de una exactitud nunca alcanzada hasta entonces.

Para las comparaciones trabajamos con coordenadas eclípticas, por tratarse de las empleadas en los catálogos antiguos. Hubo, pues, que transformar los datos sobre posiciones del catálogo del HIPPARCOS en coordenadas eclípticas. Se pudo así comprobar el desplazamiento del equinoccio de primavera por la precesión, comparándolo con las mediciones antiguas. Por último, las estrellas debieron ordenarse por las coordenadas y los brillos del catálogo HIPPARCOS. Esto conlleva dificultades considerables, derivadas de la enorme inseguridad de las posiciones y de los brillos antiguos, especialmente en Ptolomeo y Ulugh Beg, en áreas celestes densamente ocupadas por estrellas. Tuvimos que remontarnos a informaciones descriptivas acerca de algunas posiciones de estrellas en los antiguos catálogos; por ejemplo, que "la estrella número 68 es la más septentrional de otra con la que forma par y ambas siguen a la estrella número 67 en dirección a Oriente". Tales datos, suficientes para identificar las estrellas del catálogo de Ptolomeo, facilitan la identificación de las correspondientes estrellas en el registro del HIPPARCOS. En conjunto se identificaron casi 1000 estrellas con las correspondientes estrellas del catálogo del satélite.

	Ptolomeo	Ulugh Beg	Tycho
Longitud eclíptica	23,2	18,6	2,5
Latitud eclíptica	20,6	16,6	2,4

5. ERRORES CASUALES (en minutos de arco) de la longitud y la latitud eclípticas en Ptolomeo, Ulugh Beg y Tycho.

Errores sistemáticos

Cada medición estaba inevitablemente expuesta a errores. Unos procedían de fallos casuales; otros, de fallos sistemáticos. Los errores casuales varían de una estrella a otra, sin ninguna vinculación. Los sistemáticos, al contrario, tienen causas desencadenantes comunes y dependen de uno o de más parámetros; por ejemplo, la situación en el firmamento. En este caso serían falsos por sistema y de la misma forma todos los resultados de las mediciones en áreas concretas del cielo. La magnitud y la dirección de los errores cambian de un área a otra. El origen de los fallos sistemáticos podría ser quizás una colocación equivocada o un calibrado erróneo del instrumento medidor con el que se realizó la observación.

Para distinguir entre los fallos sistemáticos y los casuales se utilizan procedimientos estadísticos. Nosotros aplicamos un método desarrollado en el Instituto de Cálculo Astronómico de Heidelberg. Se expuso el conjunto de errores sistemáticos en forma de expresión analítica como función de la longitud y latitud eclípticas. Para ello, se eliminaron las estrellas con diferencias demasiado notorias; un suceso fuera de lo común podría falsear la medición en posteriores investigaciones.

En la figura *4a* se ofrecen los resultados del análisis para la longitud eclíptica del catálogo de Ulugh Beg. Cada punto representa una estrella, colocada en el lugar de su longitud eclíptica calculada (eje de abscisas). El eje de ordenadas representa la diferencia $\Delta\ell \cos \ell$ en minutos de arco entre la longitud eclíptica ℓ de la estrella, tal como se calculó por un lado según los datos del catálogo HIPPARCOS para 1437,5, y tal como fue calculada por Ulugh Beg por el otro. La curva, en la figura *4a*, representa el error sistemático en las mediciones de Ulugh Beg en función de la longitud eclíptica. El notable desplazamiento sistemático hacia la zona negativa indica que Ulugh Beg no consiguió establecer con exactitud, en el firmamento, el equinoccio de primavera.

De manera análoga se aplican en la figura *4b* las diferencias en la latitud eclíptica entre los datos del HIPPARCOS y los de Ulugh Beg en función de la longitud eclíptica. En las figuras *4c* a *4f* encontramos lo mismo, tanto para el catálogo de Ptolomeo como para los datos de Tycho. Es llamativo el error clamoroso para el punto cero en el catálogo de Ptolomeo (el desplazamiento positivo en la figura *4c*). Mayor incluso que el cometido por Ulugh Beg. Este determinó el equinoccio de primavera bastante mejor que Ptolomeo.

De la comparación con el registro del satélite resultan evidentes los minúsculos errores del catálogo de Tycho, se trate de los sistemáticos o de los casuales. Todas las figuras se representan a la misma escala y en el mismo marco. El catálogo de Ulugh Beg se mantiene en la tradición de la astronomía antigua, mientras que el catálogo de Tycho pertenece ya a una nueva era, sin cuya exactitud no se habrían podido descubrir las leyes de Kepler del movimiento de los planetas. La gran exactitud de las mediciones

El autor

HEINER SCHWAN trabaja en el campo de la astrometría en el Instituto de Cálculo Astronómico de Heidelberg. Ha sido responsable de la puesta a punto del Quinto Catálogo Fundamental.

de Tycho se basaba en la calidad de sus instrumentos. Notable talento observador, Tycho se esforzaba por reconocer el origen de los errores y reducir su repercusión.

Si atendemos a los desplazamientos globales del error del punto cero en las figuras *4a* y *4c*, apreciaremos que las variaciones restantes en la longitud eclíptica de ambos catálogos son aproximadamente iguales (entre unos –32 y +10 minutos de arco en Ulugh Beg y +12 y +55 minutos de arco en Ptolomeo). En el caso de la latitud eclíptica (*figuras 4b y 4d*) de Ulugh Beg, en cambio, se advierte mayor precisión (variaciones entre +2 y +12 minutos de arco solamente en Ulugh Beg y –20 y +20 en Ptolomeo). Los errores, mucho más pequeños en el catálogo de Tycho (*figuras 4e y 4f*), resultan casi irreconocibles en esta escala.

Errores casuales

Obtenemos los errores casuales si extraemos de los errores generales los que están representados en el diagrama de la fracción sistemática. Los errores casuales corresponden a las desviaciones de las diferencias totales (es decir, los puntos aislados de las figuras *4a-4f*) de la línea trazada. Los valores característicos de estas desviaciones están agrupados en la tabla.

En todos los catálogos, la exactitud de medición de la latitud eclíptica es un poco mejor que la de la longitud, tal como ya se indicó a propósito de los errores sistemáticos. Ulugh Beg vuelve a mostrarse algo más exacto que Ptolomeo en ambas coordenadas. Esta ligera diferencia demuestra que el catálogo de Ulugh Beg se basaba en mediciones nuevas, independientes de las ptolemaicas. La exactitud del catálogo de Tycho es, sin la menor duda, mucho mayor.

Conclusión

El catálogo de Ulugh Beg sigue enraizado en la tradición de la astronomía antigua. Cierto es que supera un tanto la exactitud del catálogo de Ptolomeo; sobre todo, en la determinación del equinoccio de primavera y en los errores sistemáticos de la longitud de la eclíptica. Mas una mejora irrelevante, si tomamos en cuenta el tiempo transcurrido entre uno y otro. El catálogo de Tycho Brahe, mucho mejor, marca un avance importantísimo en la exactitud de cálculo astronómico.

Bibliografía complementaria

CONSIDERATIONS ON THE CHANGE OF THE LATITUDES OF SOME PRINCIPAL FIXED STARS. E. Halley, en *Philosophical Transactions*, vol. 30, págs. 736-738; 1718.

THE CATALOGUES OF PTOLEMY, ULUGH BEIGH, TYCHO BRAHE, HALLEY, HEVELIUS. F. Baily, en *Memoirs of the Royal Astronomic Society*, vol. XIII, págs. 29 y 127; 1843.

PTOLEMY'S CATALOGUE OF STARS: A REVISION OF THE ALMAGEST. C. H. F. Peters y E. B. Knobel. The Carnegie Institution of Washington, 1915.

ULUGH BEG'S CATALOGUE OF STARS. E. B. Knobel. The Carnegie Institution of Washington; 1917.

VOM SCHATTENSTAB ZUM RIESENSPIEGEL. D. B. Hermann. Verlag Neues Leben Berlin. Speziell, págs. 18-19; 1978.

HIPPARCOS — DER 100.000 STERNE-SATELLIT. U. Bastian, en *Sterne und Weltraum*, n.º 10, pág. 524; 1986.

THE HISTORY OF PTOLEMY'S STAR CATALOGUE. G. Grasshof. Springer Verlag, 1990.

HIPPARCOS: DIE WISSENSCHAFTLICHE ERNTE BEGINNT. U. Bastian, en *Sterne und Weltraum*, n.º 11, pág. 938; 1997.

DIE ARMILLARSPHÄRE ALS ZIMMERPLANETARIUM. J. Biefang, en *Sterne und Weltraum*, n.º 1, pág. 40; 1999.

TYCHO BRAHE, WEGBEREITER DER HIMMELSMECHANIK. V. Witt, en *Sterne und Weltraum*, n.º 11, pág. 994; 2001.

Wolfgang Bürger

Manzanas que se atraen y cortinas de baño molestas

Para su cumpleaños, nuestro homenajeado invitó a una tropa entera de amigos del colegio. En una ventana colgamos de unos largos hilos dos bonitas y coloradas manzanas, juntas una cerca de la otra, pero suficientemente separadas para que se pudiera ver la luz diurna entre ellas. "¿Quién de vosotros", preguntamos en el corro, "se atreve a separar las manzanas soplando?" Cada uno quería ser el primero en lograr esta muestra de habilidad. Pero tantas veces como lo probara uno u otro, no sucedía lo que los niños habían esperado, sino justo lo contrario: como magnetizadas, se atraían y chocaban en el chorro de aire. Entre los niños la perplejidad no duró mucho, pero los adultos (como ya sabía "El Principito" de Antoine de Saint-Exupéry) necesitan explicaciones...

En el chorro de aire que los niños impulsaban a través de la separación con la fuerza de sus pulmones disminuye la presión del aire. La mayor presión del aire en reposo en las caras exteriores de la manzana las mueve entonces una hacia la otra. Dentro de la corriente la presión del aire cae en la misma medida en que aumenta su energía cinética (por unidad de volumen): una variación del principio de conservación de la energía, que en hidrodinámica se denomina "ecuación de Bernoulli". Sólo en una "capa límite" muy delgada, sobre la superficie de las manzanas, desempeña la fricción interna del aire una función digna de mención.

Un mal instrumento de viento: En el mismo momento en que ambas manzanas se tocan, se interrumpe casi del todo la corriente de aire a través de la separación. En el siguiente instante sí que las separará el soplo. Pero volverán a tocarse, en una oscilación como la de un péndulo; eso sí, perderán demasiada energía en el choque como para que sigan oscilando sin parar. En cambio, se puede inducir una oscilación continua en una tarjeta postal menos pesada por medio de una cerbatana (de, por ejemplo, 25 cm de longitud y 8 mm de diámetro interior) con un disco dispersor plano (de 12 cm de diámetro) en su extremo final. La oscilación no será visible, pero sí audible. Si se mantiene la cerbatana a un par de milímetros sobre la postal y se sopla fuertemente por la boquilla del tubo, el chorro de aire producido en el centro intenta en efecto alejar la postal del disco final, pero, hacia fuera del centro, la aspira la presión negativa de la corriente radial en la separación. Si la succión predomina sobre la presión, la postal se elevará hasta que tapone la abertura e interrumpa la corriente de aire; luego vuelve a caer. Si el soplador mantiene lo suficiente el resuello, la postal no se alejará mucho y volverá a ser succionada. Esto sucede unos cientos de veces por segundo, a juzgar por el tono del horroroso ruido que despide el aire entre el disco y la postal. También se puede hacer que oscile un papel ligero. Vale un simple carrete, en vez de una cerbatana de verdad. Esta manera de generar sonido se asemeja a la de los instrumentos de viento de madera, como el oboe y el clarinete, aunque éstos suenan mejor, y al arte de silbar con un tallo de hierba (*véase el recuadro*).

La cortina de baño: Las duchas rara vez son lo bastante grandes para los adultos. En mi próximo baño instalaré, si no una cabina con paredes fijas, al menos un plato de ducha de, como poco, 100 × 100 centímetros (en vez de los típicos 80 × 80). Esto sólo son veinte centímetros más en ambas direcciones espaciales, pero ¡aportan un 56 por ciento más de área! La estrechez en la ducha sería soportable si la tuviera para mí solo. Pero apenas abro el agua caliente, viene a mi encuentro la cortina de baño. En vez del agua caliente, que acaricia el cuerpo, se pega un frío PVC a los brazos y piernas. ¿A qué se debe? No cuesta plantear hipótesis, pero por el momento sólo está claro lo que vemos: cuando corre el agua, impera en el interior de la ducha una presión menor que fuera de la misma. Como la superficie de la cortina es muy grande, basta, si no es muy pesada, una pequeña diferencia de presión para que se genere una fuerza que la empuje hacia dentro.

En una universidad politécnica hay especialistas de todo lo que tenga que ver con la técnica, sea para la casa o para la industria. A fin de saber algo con mayor precisión telefoneé a un colega experto en procesos térmicos. Debía de ser competente para respon-



GABRIELA EINENKEL

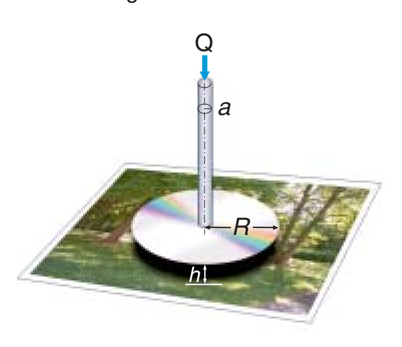
1. Cuando las manzanas no se separan soplando, se necesita un soplido mayor, ¿o no?

der mi pregunta: se ocupaba de lavavajillas, secadoras, máquinas de café y, al menos eso esperaba yo, duchas. “El problema con la ducha lo conozco”, me contestó desde el otro lado de la línea, “pero todavía no he reflexionado sobre ello. Yo siempre pego la cortina con un poco de agua al plato de la ducha”.

En la conversación siguiente, si bien no resolvimos el problema cuantitativamente, sí que aclaramos de un modo general por qué no supone una gran diferencia que la ducha sea fría o caliente: el aire no sólo se vuelve más ligero al calentarse, sino también al humedecerse. En un aire más húmedo el vapor de agua, gas invisible que no debe confundirse con la niebla compuesta de pequeñas gotitas de agua líquida en suspensión, empuja una parte del aire seco. Mientras que un mol de éste, en lo esencial una mezcla de un ochenta por ciento de nitrógeno N_2 y un veinte por ciento de oxígeno O_2, pesa unos 29 gramos, un mol de vapor de agua H_2O

La corriente genera una presión negativa

La cerbatana: La corriente vertical de la cerbatana es desviada por la tarjeta postal, en el espacio intermedio entre ésta y el disco dispersor, hacia una dirección radial. Consideramos una corriente estacionaria: a través de cada sección transversal del tubo fluyen por segundo tantos litros como los que el soplador aplica en el extremo superior del tubo. La misma corriente volumétrica Q atravesará cada estrecha faja circular de radio r encajada entre la postal y el disco dispersor. De la constancia de Q se puede deducir la velocidad del aire en los diferentes puntos del sistema, ya que con estas bajas velocidades un gas compresible como el aire mantiene su densidad ρ.



En el tubo de radio a, la velocidad del aire vale, promediada sobre la sección transversal del tubo, $v_a = Q/(\pi a^2)$. Así el aire transporta una corriente $F_E = \rho v_a Q = \rho Q^2/(\pi a^2)$. Esta es la fuerza de empuje con la que intenta llevar la postal hacia el suelo, y al mismo tiempo la reacción con la que la postal desvía horizontalmente la corriente de aire.

En el vano, a un radio r del centro, la corriente radial tiene, promediada a lo largo de la altura h de separación, la velocidad $v(r) = Q/(2\pi rh)$ (la corriente volumétrica a través de la superficie, muy baja, de la capa cilíndrica). Esta origina la presión negativa $p(r) = -\rho v^2(r)/2 = -\rho Q^2/(8\pi^2 r^2 h^2)$. (La fórmula no es exacta; en el borde R del disco dispersor la presión negativa será cero.) Esta presión, integrada sobre la superficie del disco desde $r = a$ hasta $r = R$, dará lugar a la fuerza succionadora

$$F_S = \frac{-\rho Q^2}{4\pi h^2} \ln \frac{R}{a}.$$

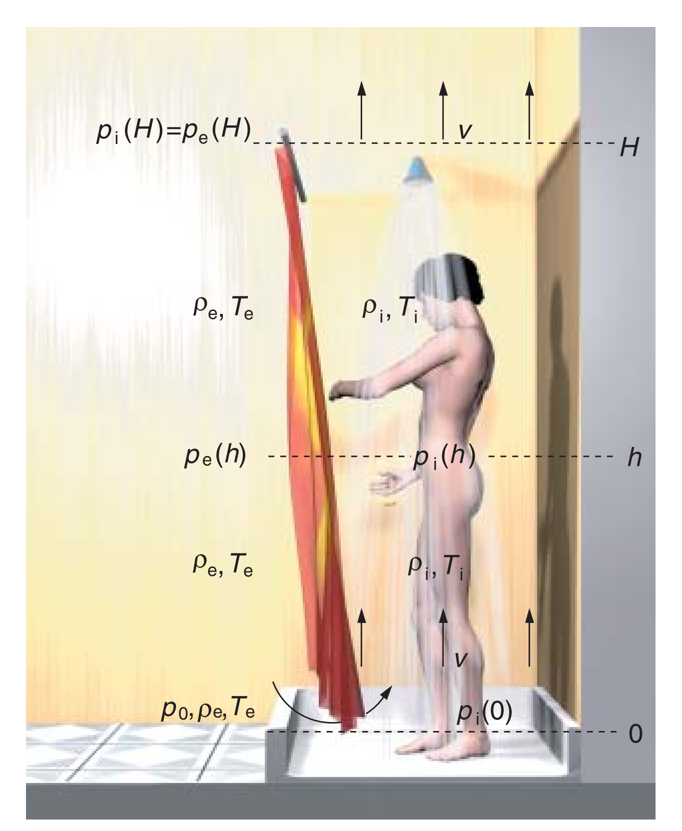
La fuerza total del aire sobre la tarjeta postal es

$$F = F_E + F_S = \frac{\rho Q^2}{4\pi h^2}\left(\left(\frac{2h}{a}\right)^2 - \ln \frac{R}{a}\right).$$

Para valores negativos de F la postal será absorbida.

Para mi cerbatana preferida (a = 4 mm, R = 6 cm), con una densidad del aire ρ = 1,29 kg/m^3, una separación h = 0,2 mm y una corriente volumétrica Q = 0,2 litros por segundo se calcula una fuerza de F = –0,27 newton o 26 pondios, que puede poner en movimiento fácilmente una postal de 4 pondios de peso.

La ducha: La temperatura T_i en el interior de la cabina de la ducha es más alta que la temperatura T_e en el exterior. Por ello, y por su mayor contenido de vapor de agua, la densidad del aire en el interior es menor que en el exterior: $\rho_i < \rho_0$. Dentro y fuera, la presión del aire es una función lineal de la altura h, pues los recintos de las duchas son muy pequeños en comparación con la altura de la atmósfera. En el exterior la presión es hidrostática: $p_e(h) = p_0 - \rho_0 gh$. En el interior del espacio de la ducha, suponiendo una corriente sin fricción, la presión cumple la ecuación de Bernoulli: $p_i(h) = p_0 - \rho_i gh - \rho_i v^2/2$. Al entrar corriente por abajo (h = 0), si se acelera hasta alcanzar la velocidad v, la presión del gas devendrá menor en la misma medida en que aumentará su energía cinética por volumen. Para la corriente que sale por arriba, la presión interna y externa son iguales ($p_e = p_i$ para $h = H$: “condición de salida de la corriente”). A partir de esto se calcula la velocidad de la corriente $v = \sqrt{2gH(\rho_0/\rho_i - 1)}$ y la diferencia de presión $p_e(h) - p_i(h) = (\rho_0 - \rho_i)g(H - h)$ para cada altura h. De $\rho_i < \rho_0$ se obtiene $p_i < p_e$; si el gas tiene en la ducha menor densidad, también tendrá menor presión, lo que hará posible que la mayor presión externa empuje hacia adentro la cortina del baño.



THOMAS BRAUN/SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



2. Un tubo de cobre de la sección de sanitarios de una tienda de materiales de construcción, cromado, con el borde doblado, de 10 mm de ancho y 300 mm de largo, un CD pegado a él... y ya está soplando el aprendiz de brujo una grandísima “tarjeta postal” hacia las alturas

se queda en 18. Bajo las mismas condiciones meteorológicas sólo tiene un 62 % de la densidad del aire seco. El aire caliente y húmedo del interior de la ducha es por ello más ligero que el aire seco del entorno.

Pero, ¿de dónde viene la baja presión del interior, que aporta al aire exterior la fuerza para empujar la cortina de baño hacia dentro? El espacio de la ducha se parece a un hogar de chimenea. En vez de formar el aire unos gases de combustión a partir de unos combustibles en una cámara de combustión, es el chorro de agua de la ducha el que aporta el calor y la humedad que hacen que disminuya (aunque sólo sea un poco) la densidad del gas. El estado en reposo de la mezcla de gas de la ducha, al estar rodeada por el aire más denso del entorno, no es un estado de equilibrio. Si se lo encerrara en ese momento en una bolsa de plástico, se tendría una especie de globo de aire caliente; si se le dejara a sus expensas y tuviera suficiente empuje para levantar su propia envoltura, ascendería inmediatamente. Sin el peso de la envoltura, el gas sólo se pondría más rápidamente en movimiento. Cuanto más movimiento gane, más disminuirá su presión.



Juan M.R. Parrondo

Las ventajas de la solidaridad

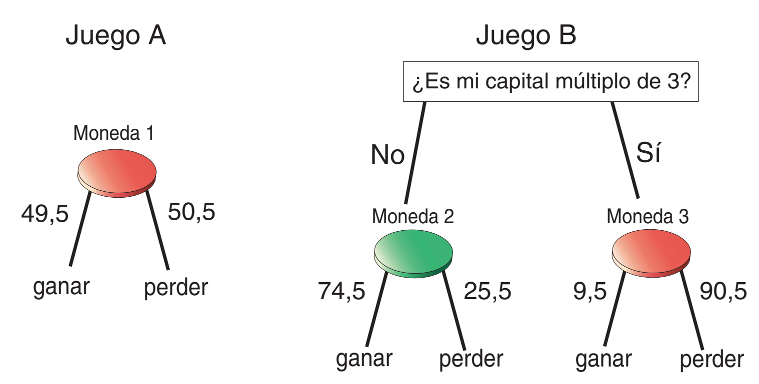
Hace más de dos años que comenzamos esta nueva etapa de la sección de *Juegos matemáticos*, y lo hicimos comentando dos juegos de azar cuyo comportamiento es sorprendente (Juegos matemáticos, julio 2001). En ambos, un individuo juega contra un casino y tiene ciertas probabilidades de ganar y perder un euro en cada turno.

El primero de ellos —lo llamaremos juego A— es similar a apostar un 1 euro a rojo o negro en la ruleta de un casino: ganamos 1 euro con una probabilidad ligeramente inferior al 50 % y perdemos 1 euro con una probabilidad ligeramente superior al 50 %, ya que con el cero gana siempre la banca. Supongamos que se gana con una probabilidad del 49,5 % y se pierde con una probabilidad del 50,5 % (estas probabilidades no coinciden exactamente con las de la ruleta, pero nos sirven para describir la paradoja). Podemos también imaginar este juego como una apuesta sobre el resultado del lanzamiento de una moneda ligeramente sesgada. El segundo juego —lo llamaremos juego B— es un poco más complicado y, obviamente, no puede encontrarse en ningún casino. Igual que en el juego A, en cada turno ganamos o perdemos 1 €, pero ahora las probabilidades dependen de lo que llevamos ganado hasta el momento (que puede ser una cantidad negativa): si lo que llevamos ganado —lo llamaremos *el capital*— es múltiplo de tres, entonces ganamos 1 € con probabilidad 9,5 %; si el capital no es múltiplo de tres, la probabilidad de ganar es del 74,5 %. Es decir, en el juego B se utilizan dos monedas, una muy desfavorable para el jugador, que se lanza cuando el capital es múltiplo de tres, y la otra bastante favorable, que se lanza cuando el capital no es múltiplo de tres. En la figura 1 se esquematizan las reglas de los dos juegos, representándose en rojo las monedas desfavorables y en verde la favorable.

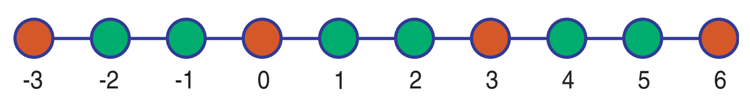
Aunque se trate de juegos de azar, el jugador pierde en media si juega muchos turnos seguidos a cualquiera de los dos juegos, A o B. Sin embargo, si juega alternándolos, ya sea al azar o siguiendo alguna secuencia periódica como AABBAABB..., entonces gana en media. Este comportamiento es a primera vista sorprendente y por ello se conoce a estos juegos como juegos paradójicos o también como *Paradoja de Parrondo*.

En los últimos años, algunos físicos y matemáticos han estudiado variantes de la paradoja original y encontrado nuevas propiedades sorprendentes de estos juegos. En este artículo vamos a comentar una de ellas, que tiene lugar cuando varios individuos juegan a B y se les permite repartir las ganancias entre turno y turno. Raúl Toral, de la Universidad de las Islas Baleares, ha demostrado que un simple reparto del capital puede convertir un juego perdedor en ganador.

Para entender cómo es esto posible, analizaremos primero uno de los mecanismos que explican la paradoja original. Piense por un momento cuántas veces se utiliza la moneda mala cuando jugamos B un gran número de turnos seguidos. A primera vista, parece que la moneda mala se debería utilizar un tercio de los turnos, puesto que se lanza siempre que el capital es múltiplo de tres. Sin embargo, si se juega B en todos los turnos, resulta que la moneda mala se utiliza 5/13 = 0,3846... de las veces que se juega, es decir, más a menudo que un tercio de las veces. La razón se encuentra en las propias reglas del juego B y se hace más clara si representamos el juego como el movimiento de una ficha a lo largo de la línea de la figura 2. Cada vez que ganamos, movemos la ficha una casilla hacia la derecha y, cuando perdemos, una casilla hacia la izquierda. Con las reglas del juego B, cuando la ficha está en una casilla roja, su movimiento más probable es hacia la izquierda, puesto que utilizamos la moneda mala, que tiene una probabilidad de ganar muy reducida, del 9,5 %. Por el contrario, en las casillas verdes el movimiento más probable es hacia la derecha. Si la ficha se encuentra en la casilla 2, por ejemplo, su movimiento más probable es hacia la casilla 3. Pero, en el siguiente turno, lo más probable es que vuelva a la 2. Por tanto, la ficha se encontrará la mayor parte del tiempo saltando entre 2 y 3, o, en general, entre un múltiplo de tres y su inmediato inferior. Esto hace que la frecuencia con la que la ficha visita las casillas rojas, es decir, la frecuencia con la que se



1. Las reglas de los juegos paradójicos A y B. Las monedas que se utilizan en cada juego son rojas o verdes según sean desfavorables o beneficiosas para el jugador



2. Representación esquemática del capital en el juego B

utiliza la moneda mala del juego B, sea superior a 1/3, ya que esta frecuencia es la que correspondería a una ficha que se mueve completamente al azar, sin ninguna preferencia de salto. Pero precisamente este movimiento por completo al azar es el que tiene el capital cuando se juega al juego A. Esta es una de las claves de la paradoja: cuando el juego B se alterna con el A, este último, a pesar de ser perdedor, hace que se utilice menos frecuentemente la moneda mala del juego B y por ello su efecto final es positivo y la alternancia resulta ser ganadora.

El juego A hace que el capital sea más aleatorio de lo que es cuando se juega sólo B; de este modo, la ficha visita menos veces las casillas rojas. Podemos decir que el juego A ayuda a "saltar" estas casillas rojas, en donde el juego B es muy desfavorable.

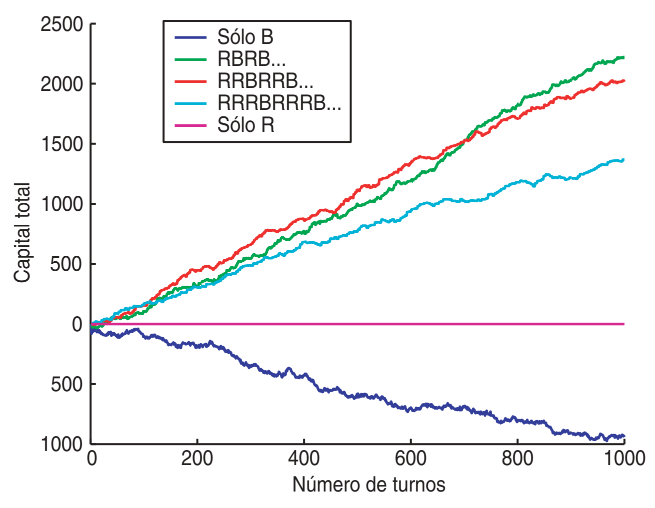
Si varios jugadores están jugando contra la banca, este mismo efecto se puede conseguir de una forma más sencilla: a los jugadores les es posible convertir el juego B en ganador sin más que redistribuir entre turno y turno sus ganancias.

Supongamos N individuos que juegan contra la banca al juego B. Ahora no disponemos del juego A, pero podemos redistribuir el capital entre los distintos jugadores. Llamaremos a esta distribución o reparto juego R. Este juego R cumple el mismo papel que el juego A en la paradoja original. He elegido como forma de redistribución la siguiente: el jugador i le da un euro al $i+1$ con una probabilidad 1/2, y recibe un euro de él con una probabilidad 1/2. Un turno de juego R consiste en realizar estos intercambios para todos los jugadores i desde el 1 hasta el $N-1$ (el jugador N sólo intercambia capital con el $N-1$).

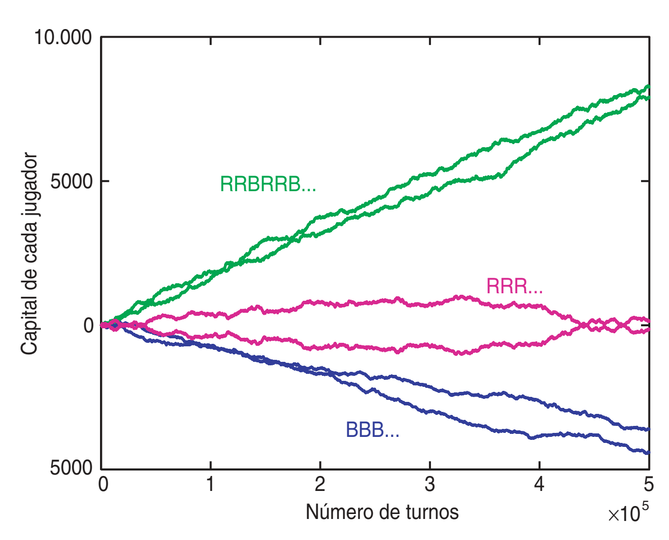
Los resultados de esos juegos se muestran en la figura 3. En esta figura se representa el capital total para 100 jugadores en función del número de turnos jugados y para distintas redistribuciones. La curva azul muestra el capital cuando no se realiza ninguna redistribución, es decir, cuando cada individuo juega contra la banca al juego B sin intercambiar nada con sus compañeros. En ese caso, todos los jugadores pierden en media y eso se ve reflejado en la disminución paulatina del capital total. Sin embargo, si se intercalan turnos de redistribución, como ocurre en las curvas roja, verde y añil, todos los jugadores ganan y el capital total aumenta. Cuando se utilizan muchos turnos en la redistribución, la ganancia se hace menor, aunque sigue siendo positiva. Como en el juego R el capital total ni aumenta ni disminuye (el individual sí), si todos los turnos se utilizan en redistribuir el capital y no se juega nunca al juego B, el capital no variará y el resultado será la recta horizontal morada de la figura. Como vemos, en estos juegos compartir es sin duda beneficioso para todos. Volviendo al esquema de la figura 2, lo que está ocurriendo es que, cuando se comparte el capital, la ayuda del vecino puede facilitarle a un individuo saltar la casilla roja y que se beneficie de las monedas buenas del juego B. Se podría decir que esto es equivalente a superar una "mala racha" con el apoyo de algún amigo o de la colectividad.

El efecto se puede conseguir incluso con sólo dos jugadores. En este caso, la redistribución es muy simple: el primero le da al segundo 1 € con una probabilidad 1/2, o es el segundo quien le da al primero 1 € con probabilidad 1/2 en cada turno de redistribución (juego R). Esta simple redistribución de capital tiene unos efectos cruciales en el desarrollo del juego. En la figura 4 mostramos el capital de cada uno de los jugadores cuando no hay reparto, cuando solamente hay reparto y no se juega nunca a B, y cuando se intercala un turno de juego B con dos turnos de reparto. La redistribución de capital beneficia a ambos, mientras que el juego en solitario es de nuevo perdedor.

El modelo de Toral enseña algo que es cada vez más necesario recordar en los tiempos que corren, especialmente a los defensores del neoliberalismo: la redistribución de la riqueza es beneficiosa para la colectividad e incluso puede ser indispensable para generar crecimiento económico.



3. Capital total de 100 jugadores en función del número de turnos para distintas combinaciones del juego B y la redistribución R



4. Capital de dos jugadores en función del número de turnos cuando juegan sólo a B (curvas azules), *a R* (curvas moradas) *y cuando alternan el juego B y la redistribución R siguiendo la secuencia RRBRRB...* (curvas verdes)

Mark Fischetti

ESQUIES ELECTRONICOS

Contra el momento angular

Durante muchos años, los esquiadores se han deslizado por las laderas cubiertas de nieve sobre largas tablas rectangulares. Pero, a mediados de los años noventa, los fabricantes empezaron a ofrecer esquíes ahusados. Viraban mejor porque concentraban el peso del esquiador en el centro del canto interior de la hoja. Se consigue así que el esquí no tienda tanto a salirse de la senda que la hoja traza cuando hiende las inevitables, pequeñas protuberancias de nieve presentes en cualquier pendiente. Este tipo de esquí domina hoy el mercado.

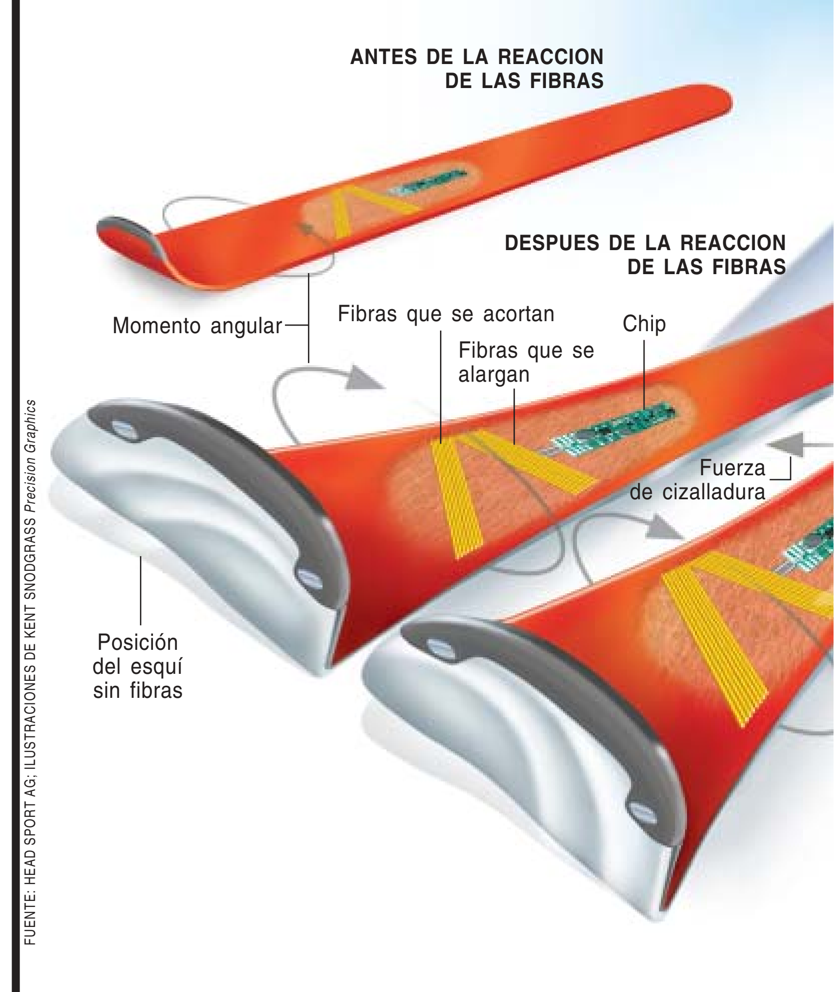
Hay un inconveniente. Las fuerzas concentradas crean un fuerte momento angular en el seno del esquí. Para preservar su integridad estructural, se debe construirlo más rígido. Pero esto implica que el esquí será proclive a vibrar. Resulta molesto e incluso puede llegar a levantarlo de la nieve; agota al esquiador.

En los últimos seis años, los fabricantes han revestido sus esquíes con diversos productos sintéticos que amortiguan las vibraciones. Pero la opción más eficaz quizá sea la ofrecida por las fibras piezoeléctricas, ya empleadas en las raquetas de tenis, que convierten en corriente eléctrica la energía de vibración, de compresión o de flexión. Un chip incrustado en el esquí acumula, invierte y devuelve la corriente, de manera que las fibras se dilaten y contraigan, contrarresten el momento angular y se trace un viraje suave y tranquilo. El uso de esquíes piezoeléctricos se está extendiendo entre los deportistas profesionales. Reaccionan con mayor suavidad y se adaptan mejor a distintos estados de la nieve.

Por desgracia, los esquíes piezoeléctricos controlados por chips, o esquíes “activos”, cuestan del orden de un 50 por ciento más. Y algunos creen que sus cualidades valen de poco en el esquí recreativo; sólo se perciben a altas velocidades sobre nieve helada. K2, una empresa notable del sector, ha desechado sus modelos piezoeléctricos, en los que las vibraciones eran absorbidas pasivamente por unos parches piezoeléctricos, no por un chip de realimentación activa. Otros diseñadores sostienen que un revestimiento de caucho concebido con inteligencia puede brindar casi las mismas ventajas por un precio mucho menor.

Pero Herfried Lammer, ingeniero de la casa austríaca Head Sport AG, el mayor fabricante de esquíes piezoeléctricos, afirma que los esquiadores prefieren la electrónica.

1. EN LOS VIRAJES, el peso del deportista presiona hacia abajo en la proximidad del centro del esquí, mientras que la fuerza reactiva de la nieve empuja hacia arriba a lo largo del borde interno del esquí. Esta desalineación de fuerzas crea un momento angular en el revestimiento superior del esquí, cuyo canto tiende así a separarse de la nieve (*esquí solo, a la izquierda*); el esquiador debe oponerse a ello para evitar un patinazo. Durante el viraje, el momento no es constante y crea unas vibraciones que se perciben como golpeteos y resbalones cuesta abajo.



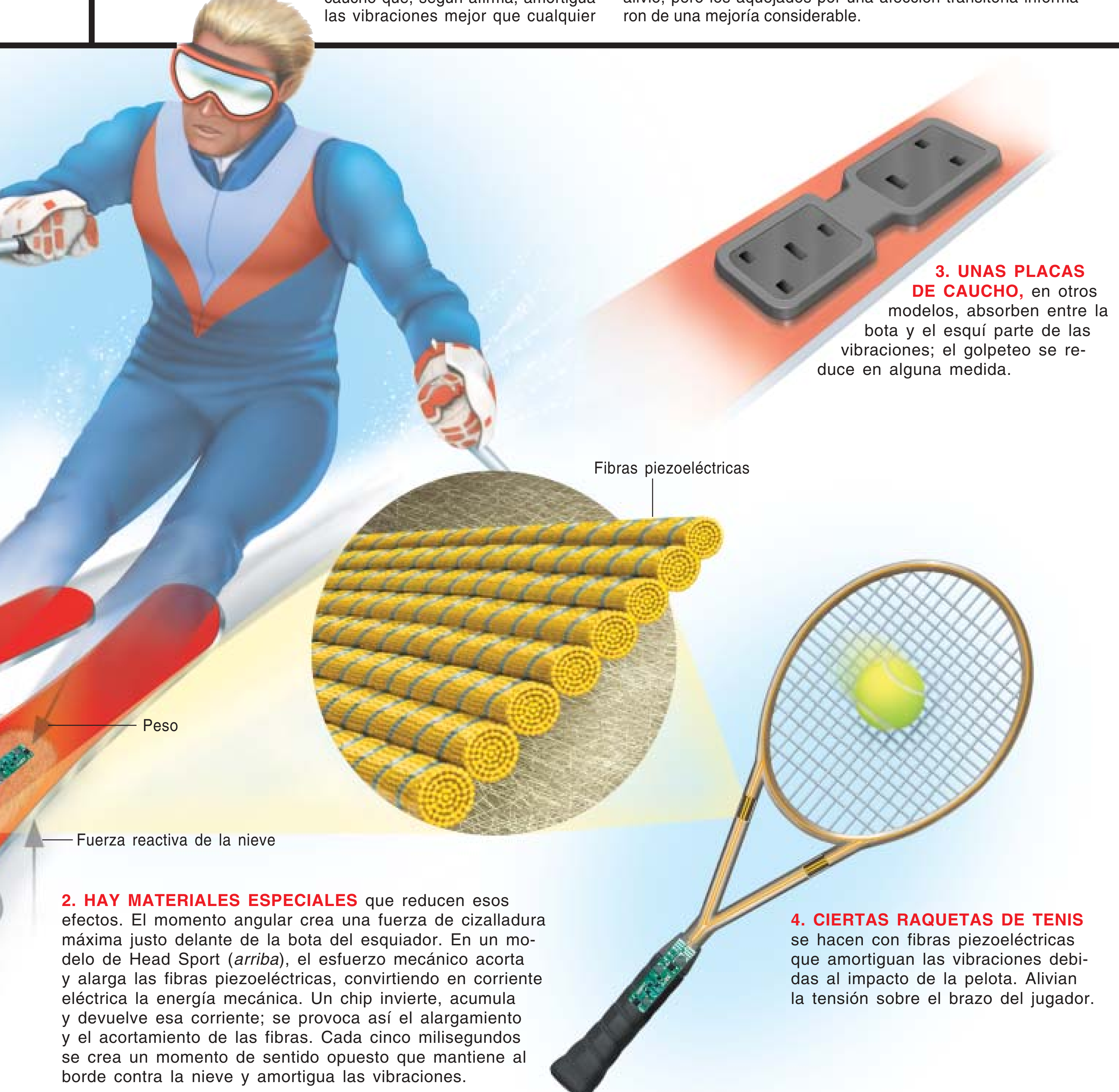
FUENTE: HEAD SPORT AG; ILUSTRACIONES DE KENT SNODGRASS *Precision Graphics*

¿SABIA USTED QUE...?

➤ **CALZADO CALIENTE:** Advanced Ceramics, de Lambertville (Nueva Jersey), está experimentando con unas botas para esquí y excursionismo autocaldeables por elementos piezoeléctricos instalados en los talones; también unas botas militares que recargan baterías. Tiene además en proyecto unos cebos de pesca, con su propia fuente de energía, que emiten sonidos de presa de pez.

➤ **UN PROFETA DEL CAUCHO:** Durante años, John Howe fue director de desarrollo de productos de Head Ski, de Baltimore, y después asesor de otros gigantes de los equipos de esquí. Pero hoy trabaja en su hogar de Waterford (Maine), donde confecciona a mano, cada año, de 50 a 100 pares de un producto innovador que él llama Garra. Lleva una capa de caucho que, según afirma, amortigua las vibraciones mejor que cualquier otro modelo de esquí. Los críticos dicen que es excelente para las heladas pistas de Nueva Inglaterra, aunque puede resultar duro sobre nieve blanda. Howe considera que muchas novedades comerciales no pasan de señuelos publicitarios.

➤ **¿CODO DE TENISTA?:** Head Sport empezó empleando materiales piezoeléctricos en sus raquetas de tenis para reducir las vibraciones que se producen en el mango tras golpear la pelota. En julio de 2002, Werner Zirngibl, del Instituto de Ortopedia y Medicina Deportiva de Múnich, entregó raquetas piezoeléctricas a 55 jugadores aficionados que estaban siendo tratados de codo de tenista, temporal o crónico. Tras seis semanas de juego regular, los que padecían la afección crónica hallaron poco o ningún alivio, pero los aquejados por una afección transitoria informaron de una mejoría considerable.



3. UNAS PLACAS DE CAUCHO, en otros modelos, absorben entre la bota y el esquí parte de las vibraciones; el golpeteo se reduce en alguna medida.

2. HAY MATERIALES ESPECIALES que reducen esos efectos. El momento angular crea una fuerza de cizalladura máxima justo delante de la bota del esquiador. En un modelo de Head Sport (*arriba*), el esfuerzo mecánico acorta y alarga las fibras piezoeléctricas, convirtiendo en corriente eléctrica la energía mecánica. Un chip invierte, acumula y devuelve esa corriente; se provoca así el alargamiento y el acortamiento de las fibras. Cada cinco milisegundos se crea un momento de sentido opuesto que mantiene al borde contra la nieve y amortigua las vibraciones.

4. CIERTAS RAQUETAS DE TENIS se hacen con fibras piezoeléctricas que amortiguan las vibraciones debidas al impacto de la pelota. Alivian la tensión sobre el brazo del jugador.

Islam

Saber exacto

THE ENTERPRISE OF SCIENCE IN ISLAM. NEW PERSPECTIVES. Dirigido por Jan P. Hogendijk y Abdelhamid I. Sabra. The MIT Press; Cambridge, Massachusetts, 2003.

THE TOLEDAN TABLES. Revisión de manuscritos y edición de las versiones textuales por Fritz S. Pedersen. Historisk-filosofiske Skrifter **24:1-4**. Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskab. C. A. Reitzels Forlag; Copenhague, 2002.

MUSLIMS AND CHRISTIANS IN NORMAN SICILY, por Alex Metcalfe. Routledge; Londres, 2003.

ESSAYS ON EARLY MEDIEVAL MATHEMATICS, por Menso Folkerts. Ashgate; Aldershot, 2003.

Entre el año 800 y el 1450 de nuestra era, la matemática tuvo en la madrasa su jardín de cultivo. Los grandes centros de estudio de la aritmética, geometría y trigonometría con sus aplicaciones a la astronomía, astrología, geografía, cartografía y óptica se repartían por el mundo islámico. Hace sólo unos decenios creíamos conocer el núcleo de ese saber a través de las traducciones al latín. Merced a la tenaz labor de los medievalistas que ha recuperado manuscritos, depurado fuentes y computado tablas, comenzamos a entrever ahora un panorama nuevo (*The Enterprise of Science in Islam*), una tradición científica mucho más rica y profunda, amasada con influencias diversas.

A la apropiación islámica de la ciencia griega en los siglos VIII y IX, coetánea con su absorción del conocimiento persa e hindú (la famosa numeración con el símbolo para el espacio vacío), siguieron, tras un apretado intervalo de reelaboración y desarrollo propios, las traducciones latinas que posibilitaron el renacimiento del Occidente cristiano en el duodécimo. Toledo y Sicilia (*Muslims and Christians in Norman Sicily*) constituyeron los focos de esa transmisión. Pero sólo una pequeña fracción del saber islámico pasó a la Europa cristiana. Y ello, pese al importante descubrimiento realizado por Charles Burnett: hubo un tercer foco traductor de astronomía al latín de pisanos afincados en Antioquía (de la actual Turquía), antes de que emergiera Toledo como capital de la traslación y se produjera en Sicilia la primera traducción, desde el griego, del *Almagesto*. De Oriente vinieron, a través de Pisa, el libro máximo de Ptolomeo, una cosmología (*Liber Mamonis*), que describe el sistema ptolemaico, y una versión de las tablas astronómicas de al-Suffi. Todos estos textos fueron escritos en la segunda mitad del siglo XII. Todo indica que de ese influjo se beneficiaron los estudiosos reunidos en torno a Abraham ibn Ezra y sus seguidores de la ribera del Ebro. Si las obras de Ibn Ezra, Robert de Ketton, Hermann de Carinthia, Rodolfo de Brujas, Hugo de Santalla y Esteban el filósofo, así como las formas orientales de los números hindú-arábigos con ellas asociados, no persistieron más tiempo se debió a que, desde 1150, Toledo marcó la pauta de la astronomía y astrología bajo la dirección de Gerardo de Cremona.

Entre los geómetras del siglo X, sobresalió al-Kuhi, fascinado por la certeza del método empleado en la construcción de las figuras y en la determinación de los volúmenes y centros de gravedad de los sólidos, incluido el paraboloide. Junto al problema del método aportó valiosas innovaciones en el debate sobre aná-

1. *MS Ait Ayache, p. 192 (posterior a 1344)*

Biotecnología

The Evolution of Developmental Pathways, por Adam S. Wilkins. Sinauer Associates, Inc., Publishers; Sunderland, Massachusetts, 2002.

El prefacio de esta obra se inicia con una cita del libro de G. G. Simpson, *The Major Features of Evolution*, *1953*, que dice: "La historia de la vida, tal como se ha producido en la naturaleza, es una amplia sucesión de ontogenias de organismos. La sucesión de ontogenias es la filogenia y ésta presenta un modelo material establecido por la evolución de la materia viva y su desarrollo en los individuos." Esta cita de Simpson muestra la importancia que da Wilkins a la evolución de las filogenias en los procesos evolutivos de los seres vivos, o quizá sería más exacto decir de los metazoos, puesto que el libro aquí reseñado no trata del desarrollo en los vegetales.

"*The Major Features of Evolution*" es una obra extensa y densa, con figuras no muy abundantes, que trata los temas con considerable detalle y profundidad a pesar de lo que el autor dice en el prefacio: "*El enfoque genético se ha hecho, no obstante, con un coste. No ha sido posible incluir todos los tópicos o debates relevantes sobre el tema de la evolución del desarrollo*". Mas, aunque los conocimientos expuestos no son exhaustivos, el contenido del libro y la amplitud con que se tratan estos conocimientos, lo hacen recomendable para los lectores interesados en adquirir una buena base sobre la filogenia del desarrollo y su significado en la evolución del Reino Animal, de acuerdo con los objetivos expuestos por el autor.

También afirma el autor que la distribución del libro, que comprende tres partes principales, está pensada para conseguir que el desarrollo de su contenido sea claro, lógico e interesante para el lector. Como se ha dicho este objetivo se consigue gracias a la profundidad y extensión de los conocimientos que aporta, aunque la densidad con que éstos se tratan puede resultar fatigosa para lectores que sólo deseen adquirir un conocimiento general del tema.

La primera parte del libro comprende cinco capítulos, que tratan de cuestiones de fondo esenciales, concretamente de las raíces históricas, la clase de datos, las formas de análisis y algunas de las ideas clave en que se basa el estudio de la evolución de los procesos del desarrollo.

En los tres capítulos siguientes, que forman la segunda parte, se presentan una serie de casos concretos sobre la evolución del desarrollo, escogidos deliberadamente sobre organismos que suelen tomarse como sistemas de referencia en el estudio de la ontogenia, tales como *Drosophila melanogaster*, *Caenorhabditis elegans*, el ratón y el pollo. El primero de estos capítulos trata de la evolución de la ontogenia del sexo, especialmente en los Mamíferos y en los Insectos, el segundo de la segmentación en los Insectos y el tercero del desarrollo de la vulva de *Caenorhabditis elegans* y de las extremidades de los tetrápodos.

La tercera y última parte de la obra comprende seis capítulos, donde se exponen cuestiones y problemas específicos de la evolución del desarrollo, así como relaciones entre estas cuestiones y otros aspectos de la evolución. Concretamente, en el primero de ellos se estudian mecanismos genéticos tales como mutaciones, duplicaciones génicas, poliploidía, variaciones en las secuencias reguladoras de la función génica, junto con conceptos generales importantes para entender los procesos del desarrollo, concretamente los de canalización y asimilación genéticas. En el segundo de estos capítulos se estudian los factores que retardan y canalizan la evolución del desarrollo. En el tercero se trata el crecimiento y la forma. En el cuarto, la especiación y la evolución del desarrollo. En el quinto se estudia el origen de los metazoos y el inicio de la evolución animal compleja. En el sexto y último, se tratan las perspectivas que ofrece el futuro en los estudios de la evolución del desarrollo.

—Antonio Prevosti

lisis y síntesis, la noción de "razón conocida" en conexión con la cuadratura del círculo y la legitimidad del empleo del movimiento en geometría. En teoría de números, los matemáticos islámicos abordaron las "disposiciones armoniosas de los números" (*adad al-wafq*), es decir, los cuadrados mágicos. Un cuadrado mágico es la matriz cuadrática de números enteros: cuya suma de todos los elementos de cada columna, fila o diagonal son iguales. En términos modernos, el número de elementos de cada fila, columna o diagonal constituye el orden del cuadrado mágico; la suma de los elementos de cada fila, columna o diagonal forma la constante mágica.

De las disciplinas matemáticas recibidas de los griegos, la óptica sufrió una transformación radical hasta convertirse en ciencia genuinamente árabe. Con el título de *al-Manazir* se vertieron los tratados de *Optika* de Euclides y Ptolomeo a comienzos ya del siglo IX. En la primera mitad del siglo XI, al-Hasan ibn al-Haytham presenta su revolucionario (en términos de A. I. Sabra) *Kitab al-Manazir*, que vertido en España, determinó el nuevo enfoque de la ciencia de la luz que perviviría hasta bien entrado el siglo XVII. En línea con la opinión aristotélica sobre la visión entendida como recepción de formas de luz y color, nuestro Alhacén concedía a la psicología un papel nuevo y fundamental, al tiempo que tendía un puente con el sistema ptolemaico en astronomía.

En el ámbito de la medicina, la matemática importaba sobre todo en la administración e interpretación de la eficacia gradual de los fármacos. La tradición galenista había clasificado las medicinas en cuatro grados; con mayor precisión, había caracterizado unas como templadas y otras que se alejaban de ese equilibrio en cuatro grados. (Los grados significaban la potencia de la droga en función de las



2. Cambrai, Biblioteca municipal 930, fol. 27v-28r, muestran la notación alfanumérica así como las formas orientales de los números hindú-arábigos

cuatro cualidades elementales: caliente, frío, seco, húmedo.) Averroes escribe su *al-Kulliyyat*, *Kitab al-Adwiya wa-l-Aghdhiya* ("Libro de medicamentos y alimentos"), contra la tesis innovadora de al-Kindi, del siglo IX; de acuerdo con éste, la intensidad del fármaco crecía geométricamente con el aumento de grado, según la regla de la "razón doble"; así, la intensidad de una droga en primer grado dobla la de un fármaco templado; la de una medicina en segundo grado cuatriplica la intensidad de la templada; un fármaco en tercer grado es ocho veces más intenso; otro en cuarto grado, 16 veces más intenso que la medicina templada. A ello Ibn Rush contrapropone un incremento algebraico.

Los artículos dedicados en este número de la revista a quien epitomiza la ciencia astronómica islámica después del período medieval, el *Zij* de Ulugh Beg, nos eximen de ponderar su figura. Según parece, influyó en el *Zij al-Sharif* ("Manual de la astronomía noble") redactado por Sabjaq Dar en Túnez en el siglo XVII y estudiado por Julio Samsó. En su repaso por la transmisión del conocimiento astronómico, andalusí y magrebí, el profesor barcelonés se detiene en el fenómeno de la "trepidación", que es la oscilación de las longitudes eclípticas de las estrellas fijas con respecto al punto vernal. (Tema sobre el que realizó su alumna Montse García Fajardo la tesis doctoral, publicada recientemente.) Adviértase que, en los *zijes* andalusíes, las tablas de movimientos medios son sidéreas.

La astronomía andalusí, en particular, y la historia de la ciencia española en general, han dado un paso de gigante con la publicación de *The Toledan Tables*, una obra magistral en cuatro volúmenes preparada por Fritz S. Pedersen. Las *Tablas Toledanas*, traducidas al latín en el siglo XII, perdidas las originales árabes, nos han llegado en revisiones latinas, tres principales y varias menores. Las principales quizá divergían ya en la tradición árabe. Parten de una doble fuente esencial, Albattani, del 900 d. C., y Alkhwarizmi, de la primera mitad del siglo IX, a las que se sumaron tablas árabes posteriores. Alkhwarizmi empleó fuentes hindúes y persas; Albattani se apoyó principalmente en las *Tablas manuales* de Ptolomeo, aunque añadiendo bastante de su propia labor.

Para el manejo de las mismas se requerían determinadas reglas o cánones. También se ofrecen aquí. Los denominados Ca, Cb y Cc representan por lo menos dos traducciones independientes del árabe. Tablas y cánones sufrieron ulteriores revisiones; en concreto, la "vulgata tardía" se empleó en torno a 1270 y persistió hasta bien entrado el siglo XIV, cuando las *Tablas*

Toledanas cedieron paso a las *Tablas Alfonsíes*. (Los cánones Cb siguieron copiándose cien años más tarde.) Hasta entonces, las *Toledanas* se emplearon para los cálculos astronómicos y constituyeron el patrón para otros cómputos: calendarios, resúmenes de teoría planetaria, tablas especiales derivadas para lugares particulares y otros escritos de interés educativo y cultural.

En las versiones completas se ofrecen tablas, establecidas para el meridiano de Toledo, que permiten calcular la longitud eclíptica del Sol; las longitudes y latitudes de la Luna y de los cinco planetas; los eclipses solares y lunares; la deriva de los equinoccios y las fases de los planetas. Les acompañan tablas auxiliares para la conversión entre fechas calendáricas de acuerdo con la era islámica (la Héjira) y con otras eras; y tablas para la trigonometría esférica (conversión entre conjuntos diferentes de coordenadas celestes). Hay que añadir tablas de coordenadas de las estrellas fijas y posiciones geográficas de diversas ciudades, así como tablas para cálculos astrológicos. Por su parte, los cánones, en texto llano, forman un todo coherente con las tablas.

Al entramado lingüístico y sociopolítico de otro epicentro traductor, Sicilia, y en particular al período formativo del control normando (1061-1194), ha dedicado Alex Metcalfe su tesis de grado (*Muslims and Christians in Norman Sicily*). Si en la víspera de la invasión musulmana de 827 se hablaban dialectos latinos o griegos, a la llegada de los normandos, en torno a 1060, el árabe y el Islam predominaban. Pero en 1250 Sicilia era ya casi exclusivamente cristiana y hablaba romance. Esas dos transiciones lingüísticas concurrieron con cambios demográficos, sociales, administrativos y religiosos. El conflicto de los musulmanes con los normandos puede considerarse el de mayor impacto cultural, si bien vino precedido por otros enfrentamientos entre árabes y bizantinos; vándalos y bizantinos; cartagineses y romanos; fenicios y griegos. Con los normandos quedaría por fin, hasta hoy, en la órbita europea.

En puridad, la recuperación cristiana de la isla no fue ni invasión ni normanda. Una modesta fuerza militar, al mando de Robert Guiscard y Roger de Hauteville, entró por el este de la isla para ayudar a un bando de la guerra civil. Robert no viviría para ver la caída del último bastión árabe en 1091 y Roger fue asesinado diez años más tarde. Pero los hijos de Roger, el único conde normando, no tenían ya lazos que les ligaran al lugar del progenitor. El mismo hacía decenios que partió de su tierra y, por tanto, sus recuerdos debían estar muy desvaídos. Implantado el nuevo orden, algunas de las familias musulmanas más ricas de Sicilia emigraron hacia el Magreb, al-Andalus y norte de Africa. Muchos tomaron el epíteto de *al-Siquilli*. Así, el poeta Ibn Hamdis, natural de Siracusa, abandonó la isla en 1078 y se asentó en Sevilla, para recalar por fin en el norte de Africa. También llegó a al-Andalus Ibn al Qatta, quien escribió sobre historia y gramática; se trasladó luego a Egipto, donde se ocupó de la educación de los hijos del *wazir* fatimida al-Afdal.

Evolución de la meteorología

EYEWITNESS: EVOLUTION OF THE ATMOSPHERIC SCIENCES, por R. G. Feagle. Historical Monograph Series. American Meteorological Society; Boston, 2001.

He aquí un interesante libro que tendrá pocos lectores. La razón de este pronóstico es que el interés se limitará a una reducida tribu o, como se diría en la jerga contemporánea, a un colectivo restringido. En efecto, los potenciales interesados, para serlo, habrían de cumplir ciertas condiciones: 1) Ser meteorólogos. 2) Ser veteranos, y 3) Ser buenos conocedores de las interioridades no sólo de las universidades norteamericanas sino incluso de las instituciones políticas de aquel país.

En ausencia de una o más de estas condiciones, el hipotético lector se encontrará frente a un galimatías agravado por el necesario pero irritante y continuo uso de siglas (ICAS, ICSU, NAS/CAS, GSFC, etc.; menos mal que el autor se ha apiadado y ha tenido la delicadeza de incluir un glosario de ellas en el apéndice, lo que es un rotundo acierto), y lo más probable es que renuncie a seguir leyendo.

La otra clase de lectores, los interesados en el tema, convendrá en que el libro, pese a su brevedad (sólo 129 páginas), resulta difícil de leer. Quien logre llegar al final, hallará que el título está muy bien escogido: en primer lugar, *testigo presencial* y en segundo, *evolución de las ciencias atmosféricas*. En efecto, el desarrollo del libro parece primar la personalidad del profesor Feagle sobre la evolución y el progreso de las ciencias atmosféricas, que se trata más bien como un apéndice de la contribución de aquél. En cambio, se pasa con cierta rapidez sobre las cuestiones de más interés: a la segunda mitad del siglo XX (aquella en que la meteorología ha progresado substancialmente) se dedica sólo página y media, si bien algunos de los temas han sido ya tratados o mencionados. Un proyecto frustrado.

—MANUEL PUIGCERVER

Pero los reyes de Sicilia, que hablaban árabe, se ganaron pronta fama de "islámofilos" entre los propios musulmanes. A lo largo de buena parte del siglo XI persistió una elite cultural árabe que iría retirándose en favor de otra emergente latina. En la primera parte del siglo XII los consejeros áulicos Jorge de Antioquía, Abd al-Rahman y Abu l-Daw procedían de círculos árabo-islámicos o cristianos que hablaban griego. De acuerdo con un autor de principios de esa centuria, "había expertos en griego y en árabe en Sicilia y Salerno, donde podían encontrarse maestros, a quienes consultar cuando se quisiera". El encargo de obras no era sólo una cuestión real. Maio, *amir* de *amires* desde 1154-60 le pidió a Henry Aristippus que tradujera, del griego al latín, los libros de Diógenes sobre las vidas y doctrinas de los filósofos. En 1160 Aristippus sustituyó a Maio como jefe de la administración un día después del asesinato de éste. Dos años antes, había llegado de una misión diplomática de Constantinopla portando un ejemplar

Matemática en la Academia de Ciencias

HORIZONTES CULTURALES. LAS FRONTERAS DE LA CIENCIA. 2000: AÑO MUNDIAL DE LAS MATEMÁTICAS. Revista de la Real Academia de Ciencias. Vol. 95, n.º 1-2. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Espasa, 2002.

El año 2000 fue proclamado Año Mundial de las Matemáticas en la Declaración de Río de 1992. Ello supuso que los matemáticos se cuestionaran, el 2000, qué problemas internos quedaban por resolver, qué otros supondrían un reto para el futuro, cuál era la misión de difundir las matemáticas y cuáles las relaciones de la matemática con otras disciplinas. La matemática, hacer proteico, no está encerrada en una torre de marfil a pesar de su mala imagen mediática de incomprensible y, en el fondo, responsable de los "fracasos escolares". España no era una excepción y todos tratamos de colaborar en la empresa.

La Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales acordó celebrar un ciclo de conferencias con este motivo. Se desarrolló en Madrid, Málaga, Jaén, Ciudad Real y Toledo. Catorce conferencias cuyo contenido compone este volumen. Como el objetivo se centró en promover el interés social por la matemática más que en dirigirse a especialistas, las conferencias abarcan un amplio campo de temas predominando el enfoque de las contribuciones matemáticas a campos del saber.



Andrej Andrejewitsch Markow (1856-1922)

Tras un análisis de las relaciones de la Academia con las matemáticas por Martín Municio, no siempre cordiales, Javier Etayo se centra en el primer tema planteado en la Declaración de Río: La imagen de las matemáticas. Imagen que ha sido, en general, negativa. Etayo trata de convencer de que la matemática constituye una faceta de la cultura vigente en cada momento histórico. A los momentos estelares de la matemática dedican su trabajo Montesinos y Valdivia, al igual que López Pellicer, quien, desde la historia, trata de captar la estructura racional del pensamiento matemático con el problema que a esa estructura planteó el infinito actual. Problema que conduce a los teoremas de Gödel y sus generalizaciones, cuya exposición no técnica es el tema de Rodríguez Salinas.

A partir de este ensayo se produce una inflexión y los temas de los conferenciantes se dedican al papel de la matemática. Darío Maravall analiza la utilidad de las matemáticas para el progreso material e individual humano y Pilar Bayer retoma la pregunta de Dedekind: "¿para qué sirven los números?". De modo histórico, hace un recorrido desde los sistemas de numeración hasta la teoría matemática de la informática y la de los códigos correctores de errores que, para su desarrollo, exigen del ordenador. Sixto Ríos y Daniel Ríos contraponen el razonamiento lógico con el plausible y, desde aquí, el paso a las probabilidades. El enlace de física y geometría es tan íntimo que, para Pedro Luis García, pueden estimarse cara y cruz de una moneda. Rechazando la idea de que sólo es matemática la especulativa, Fernández Pérez trata de mostrar la potencia de la matemática como herramienta para modelizar y entender los mercados financieros mientras Ildefonso Díaz apuesta por criterios variacionales para sostener lo óptimo como estrategia. No podía faltar la modelización en medicina que desarrolla García Barreno ni los temas del control de la incertidumbre por Girón González y J. M. Bernardo. Dobado González y Gabilondo Tixaire vuelven a la relación entre matemática y física ahora en los terrenos de la mecánica cuántica. El libro termina con un trabajo de Miguel de Guzmán en el cual trata el primero de los objetivos del Año Mundial: los grandes desafíos del siglo XXI centrándose en los problemas de la matemática hacia el futuro; como novedad, el texto completo de la ponencia de Guzmán se incorpora en CD.

El libro está muy bien editado y con numerosas fotografías de los grandes matemáticos, tablas y gráficos.

La labor de la Real Academia no se limita a promover ciclos de conferencias en algunas ocasiones. Uno de sus aspectos es la edición de la *Revista* donde publicar trabajos de investigación, revisión y comunicaciones que se presentan en sus sesiones científicas. El volumen 95 es un número monográfico que contiene tres ciclos de conferencias de la Sección de Exactas a lo largo del curso 2001-2002. El primero conmemoró el tricentenario de Bayes con la edición facsimilar del ensayo en el que plantea su doctrina estadística enfrentada a la frecuentista. El trabajo de Bayes es analizado en los artículos de J. Bernardo, Javier Girón y M. Martínez, Ríos, Moreno y Moguerza. El 2002 fue el centenario de la aparición de la integral de Lebesgue. Rodríguez Salinas e Ildefondo Díaz analizan esta integral en sí y en sus aplicaciones. Finalmente, un tercer bloque dedica homenaje a uno de los matemáticos españoles más ilustres del siglo XX: Luis Santaló. Lo hacen amigos y discípulos como Sixto Ríos, Claudi Alsina, Antonio Naveira y Miguel de Guzmán. Un magnífico complemento monográfico al volumen dedicado al Año Mundial de las Matemáticas.

—JAVIER DE LORENZO

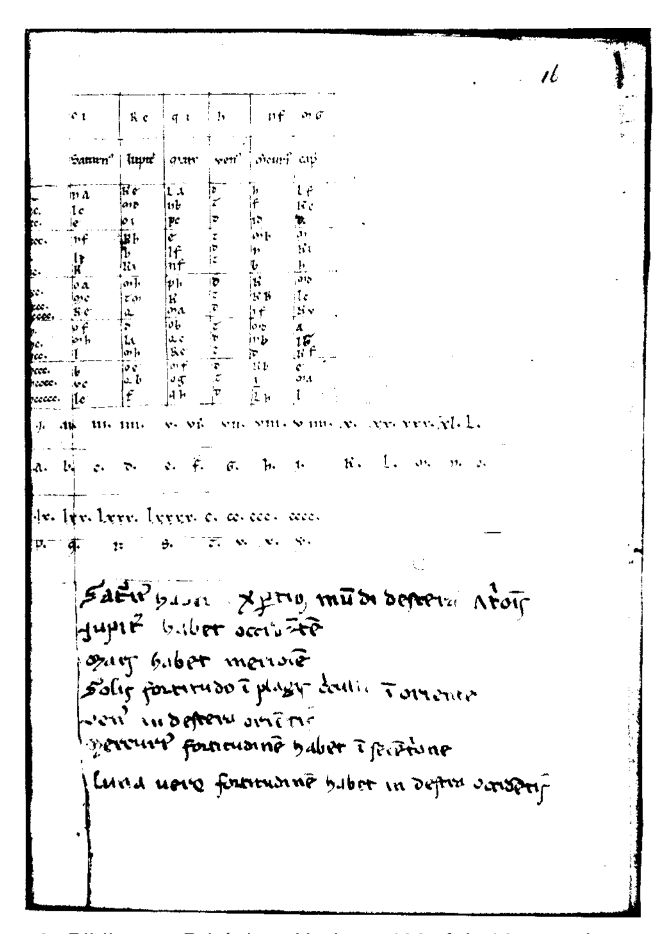
del *Almagesto* de Ptolomeo como regalo del emperador Manuel II a Guillermo I. Otro ministro, Eugenio, lo vertió al latín. Con toda razón podía decirse que "la corte era una academia".

Para entender el alcance del desarrollo de la matemática islámica hemos de compararlo con la situación de la Europa latina, a la que Menso Folkerts ha consagrado largos años de fructífera investigación (*Essays on Early Medieval Mathematics*). Lo primero que trasluce la documentación recabada es la inanidad de un viejo prejuicio, todavía persistente en algunos estamentos docentes superiores de nuestros pagos, según el cual la Edad Media Occidental antes de las traducciones del siglo XII constituiría un páramo.

En la Alta Edad Media circularon muy pocos textos matemáticos. La antigüedad tardía había heredado de los romanos un escaso interés por la matemática teórica. Bastaban los manuales de los *agrimensores* (topógrafos e inspectores) para resolver los problemas legales de la vida diaria. Algunos, sin embargo, en particular los de Balbus, Epaphroditus y Vitruvius Rufus, aportaban procedimientos geométricos, con disertaciones sobre unidades de longitud, áreas y volúmenes, perímetros y diversas figuras del plano. Los altomedievales manejaban también extractos de los *Elementos* de Euclides. Unos se tomaron de la traducción de Boecio; otros, de las enciclopedias de Marciano Capella, Casiodoro o nuestro Isidoro.

La mayoría de los textos geométricos del *Corpus agrimensorum* se compilaron en el monasterio de Corbie, durante los siglos VII y VIII. También en el *scriptorium* de ese cenobio se copió la *Geometría I* atribuida a Boecio, uno de los tratados más influyentes entre los anteriores a las traducciones del árabe. En su labor, los monjes no se movían tanto por fines de división de las tierras cuanto por mor de la enseñanza de la geometría en el cuadrivio. En ese aspecto, los códices diferían de otros escritos técnicos (medicina y agricultura), de claro sentido aplicado. Sobre el *Corpus agrimensorum* se fundó la *Geometria incerti auctoris*, muy difundida desde finales del siglo nono. Esa dependencia se advierte en la segunda parte, que aborda cálculos sobre triángulos, cuadriláteros y polígonos, el círculo y los sólidos simples. De mayor interés, la parte primera se plantea cómo determinar la anchura de los ríos, la altura de las montañas y la profundidad de los pozos. Se citan diversos instrumentos y según parece hicieron amplio uso de la semejanza de triángulos.

Con todo, uno de los textos geométricos más importantes escritos antes del siglo XII fue la *Geometría* de Gerbert. Se sirvió del *Corpus agrimensorum*, del comentario de Calcidio sobre el *Timeo* de Platón, el *De quantitate animae* de san Agustín, la *Arithmetica* de Boecio y su comentario a las *Categorías* de Aristóteles, el comentario de Macrobio al *Somnium Scipionis* y la enciclopedia de Capella. Incompleto, explica los términos básicos de la geometría, introduce pesos y medidas con sus conversiones, indica, fundado en Euclides, los distintos tipos de ángulos y ofrece procedimientos para resolver triángulos y cuadriláteros. Pudo muy bien ser el texto empleado en la escuela catedralicia de Reims, que dirigió. En algunos manuscritos se reflejan los debates producidos en Lorena a comienzos del siglo XI en torno a la suma de los ángulos de un triángulo y a las definiciones de ángulo interior y exterior. Disputa que llega a los monasterios y escuelas catedralicias de Colonia y Liége.



3. Biblioteca Británica, Harley 5402, fol. 16r, escrito en notación alfanumérica

La matemática recreativa, de resonancias griegas y bizantinas, gozó de manifiesto aprecio en el Occidente latino. De la centuria nona proviene el texto más antiguo, el *De arithmeticis propositionibus*. Consta de cuatro partes. Tres se ocupan de juegos matemáticos entre dos individuos ("piensa un número", etc.) y ofrecen procedimientos para encontrar el número buscado; en la cuarta hallamos reglas para la adición de números positivos y negativos. Conocieron también amplia aceptación las *Propositiones ad acuendos iuvenes*, donde se plantean 56 problemas para su resolución; entre ellos, el del lobo-cabra-col. Genuinamente medieval, inventado en el sur de Alemania en el siglo XI, era el juego de la "Rithmomachia", que se desarrollaba en un doble tablero de ajedrez con piezas inscritas en su parte superior con números especiales. Tales números se generaban a partir de dígitos pares e impares mediante el uso de las proporciones numéricas pitagóricas.

—Luis Alonso

AVENTURAS PROBLEMÁTICAS

Dennis E. Shasha

¡No me digas!

Yo me lo repito. Yo te lo pregunto.

Quizás, al leer la primera oración, se haya sentido intrigado. ¿Qué es lo que se repite? Sin duda, se habrá observado en el paralelismo de la estructura de la segunda y la primera, y tal vez se haya preguntado de qué se habla.

Este mes, el objetivo consiste en estudiar esos paralelismos. Se dirá que una secuencia de símbolos (cada uno de los cuales representa una o varias palabras) es “sorprendente” si, para cada par de símbolos X e Y, y para cada distancia D, a lo sumo existe en la secuencia una posición en la que X precede a Y una distancia D. En las dos oraciones del comienzo la distancia entre “Yo” y “lo” es la misma, por lo que esas frases de ocho palabras no sería considerada sorprendentes.

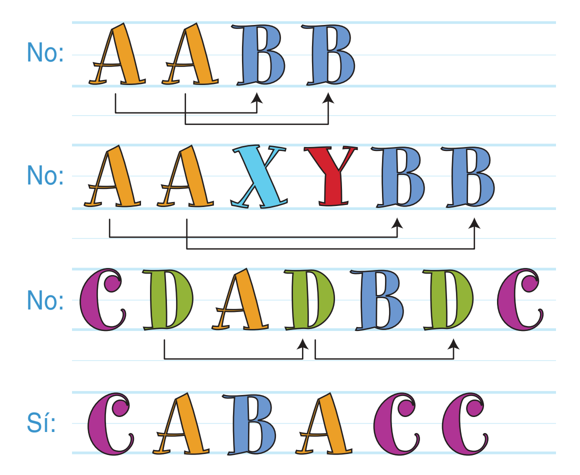
He aquí otros ejemplos, con símbolos: AAB es sorprendente, y también lo es AABA, pero AABB no lo es, porque en dos casos la A va seguida a dos pasos por la B (o sea, a distancia 2). De igual manera, AAXYBB no es sorprendente, porque la A está seguida dos veces por la B a cuatro símbolos de distancia.

Como ejercicio de calentamiento, explique por qué no es sorprendente la siguiente secuencia, compuesta por los símbolos A, B y C: BCBABCC. Inversamente, busque una secuencia sorprendente con los símbolos A, B y C que tenga una longitud de, por lo menos, siete símbolos.

He aquí tres problemas mucho más difíciles: Construya una secuencia sorprendente, de la máxima longitud de que usted sea capaz, que contenga cinco símbolos distintos. Encuentre seguidamente secuencias tan largas como pueda que utilicen 10 símbolos y 26 símbolos, respectivamente. Le resultará cómodo utilizar las letras del alfabeto (obviemos la Ñ y demás símbolos que sólo se utilizan en algunas lenguas): de la A a la E, de la A a la J, y de la A a la Z, respectivamente. Se podrá observar que la longitud no crece muy rápidamente. Por mi parte, soy de la opinión de que, incluso con 26 símbolos, la secuencia sorprendente de máxima longitud tiene menos de 100 letras.

De la noción de “sorpresa” que se ha definido aquí se dice que es “de orden 2,” porque sólo concierne a pares. Cabría definir una de orden tres como sigue: para cada terna de símbolos y cada par de distancias D1 y D2 existe en la secuencia, a lo sumo, una posición en la que el primer símbolo (X) precede al segundo (Y) una distancia D1 y el Y precede al tercero (Z) en D2.

¿Cuál es la máxima secuencia tri-sorprendente compuesta por las cinco primeras letras del alfabeto que logrará usted encontrar? No conozco reglas sencillas que proporcionen las secuencias sorprendentes de orden *k* de máxima longitud compuestas por subconjuntos de *k* símbolos tomados de un conjunto de *n*. ¿Podrán los lectores hallar una teoría elegante?



NINA FINKEL

SOLUCION DEL PROBLEMA PRELIMINAR: BCBABCC no es sorprendente, porque la letra B precede dos veces a una segunda B situada a distancia 2. Una secuencia sorprendente de longitud 7 es BACCBCA.

Solución del problema del mes pasado:

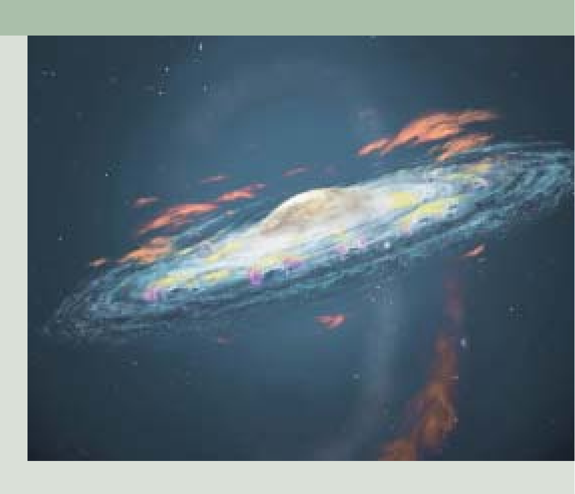
Las permutaciones siguientes no son posibles con tres niveles de válvulas:
ADECB
AEDBC
BCDEA
CEDAB
DEACB
EABCD
No obstante, todas estas permutaciones sí serían posibles con cuatro niveles.

Solución en la Red

Se puede ver la solución del problema de este mes visitando www.investigacionyciencia.es

EN EL PROXIMO NUMERO... ...DE MARZO 2004





ACTIVIDAD DINAMICA DE LA VIA LACTEA, por Bart P. Wakker y Philipp Richter

Durante mucho tiempo supuesta una reliquia de un pasado lejano, la Vía Láctea es un objeto vivo y dinámico.

DESCODIFICACION DE LA ESQUIZOFRENIA, por Daniel C. Javitt y Joseph T. Coyle

Una comprensión más plena de la señalización cerebral en la esquizofrenia ofrece enfoques nuevos y esperanzas de tratamientos mejores de esta enfermedad.

LA VIDA DIARIA EN ÇATALHÖYÜK, por Ian Hodder

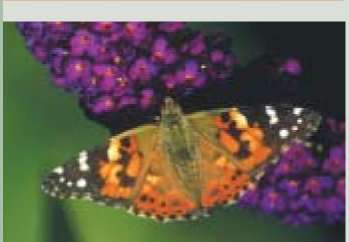
El mayor poblado neolítico conocido nos da algunas claves sobre los papeles que correspondían a los dos sexos en las primitivas sociedades agrícolas.

SISTEMAS DE IDENTIFICACION POR RADIOFRECUENCIA, por Roy Want

Ya habituales en sistemas de seguridad y cabinas telefónicas, las etiquetas de identificación por radiofrecuencia se conjugan con lectores para realizar numerosos procesos hasta ahora confiados al esfuerzo humano.

ATOMOS DEL ESPACIO Y DEL TIEMPO, por Lee Smolin

Percibimos el espacio y el tiempo como si fueran continuos. Mas, si la extraña teoría de la gravedad cuántica de bucles fuera correcta, estarían formados por elementos discretos.



PERDIDA DE SINCRONIA DE LOS ECOSISTEMAS, por Daniel Grossman

Las temperaturas aumentan antes en primavera; las especies de varios ecosistemas interdependientes se apartan cada vez más de la sincronía.

LA PRIMERA CALCULADORA DE MANO, por Cliff Stoll

Se llamaba “Curta” y resultó providencial cuando su inventor se vio en un campo de concentración nazi.

GALAXIAS EN COLISION, por Lourdes Verdes-Montenegro

La imagen de un universo estático e inmutable dista mucho de la realidad. Las galaxias son sistemas cambiantes que sufren transformaciones espectaculares debido a la interacción entre unas y otras.

ETNOCLIMATOLOGIA EN LOS ANDES, por Benjamin H. Orlove, John C. H. Chiang y Mark A. Cane

Un estudio interdisciplinario descubre la base científica del método que los agricultores patateros de los Andes usan tradicionalmente para predecir las próximas lluvias.

